

文章编号: 1671-251X(2025)04-0044-13

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18241

矿井智能通风研究进展及展望

刘湘滢

(昆士大学, 澳大利亚 布里斯班 4000)

摘要: 从通风参数监测技术、通风网络实时解算方法、通风灾变应急调控技术和矿井智能通风系统架构 4 个方面, 分析了通风参数检测设备、测定方案优化、网络实时监测与解算、异常诊断方法及应急调控技术等方面的研究进展。指出当前智能通风系统面临三大关键挑战: 现有通风参数检测装置在稳定性和准确率方面存在不足, 导致系统难以实现秒级响应与精准调控; 矿井环境的高度不确定性与人机协同决策自动化水平低, 制约着通风网络的自适应优化能力; 火与瓦斯复合灾害的实时辨识技术尚未突破, 限制了灾害工况下的应急通风调控效能。针对上述问题, 提出未来重点攻关方向: ① 通过研发抗干扰性能强的新型传感设备, 构建“固定监测+移动巡检”融合的时空动态监测网络, 实现通风多参数的精准感知。② 基于数字孪生技术建立通风网络超实时仿真模型, 结合强化学习与博弈论方法优化局部决策与全局策略的协同机制, 推动智能决策体系向云端协同模式发展。③ 构建数字孪生驱动的灾情演化推演平台, 集成动态逃生路径规划与机器人集群快速布防技术, 形成“灾情预警-区域隔离-智能救援”三级应急响应体系。

关键词: 矿井通风; 智能通风; 通风参数; 风网解算; 通风灾害防控

中图分类号: TD724

文献标志码: A

Research progress and prospects of intelligent mine ventilation

LIU Xiangying

(The University of Queensland, Brisbane 4000, Australia)

Abstract: The research progress has been analyzed from four aspects: ventilation parameter monitoring technology, real-time calculation methods for ventilation networks, emergency regulation technology for ventilation disasters, and the architecture of intelligent mine ventilation systems, focusing on ventilation parameter detection devices, optimization of measurement schemes, real-time monitoring and calculation of networks, anomaly diagnosis methods, and emergency regulation technologies. Currently, intelligent ventilation systems face three major challenges. First, existing ventilation parameter detection devices are insufficient in stability and accuracy, making it difficult for the system to achieve response within seconds and precise regulation. Second, the high uncertainty of the mine environment and the low level of automation in human-machine collaborative decision-making limit the adaptive optimization capabilities of the ventilation network. Third, real-time identification technologies of fire and gas compound disasters have not yet been broken through, restricting the effectiveness of emergency ventilation regulation in disaster conditions. To address these challenges, the future research directions should focus on: ① Developing new sensor devices with strong anti-interference capabilities to construct a spatiotemporal dynamic monitoring network that integrates "fixed-point monitoring+mobile inspection", enabling precise multi-parameter ventilation perception. ② Establishing an ultra-real-time simulation model for the ventilation network based on digital twin technology, and combining reinforcement learning and game theory methods to optimize the coordination between local decision-making and global strategy, thereby

收稿日期: 2025-03-12; 修回日期: 2025-04-15; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

作者简介: 刘湘滢(2000—), 女, 广东深圳人, 硕士研究生, 研究方向为安全技术与管, E-mail: candiceliu73@gmail.com。

引用格式: 刘湘滢. 矿井智能通风研究进展及展望[J]. 工矿自动化, 2025, 51(4): 44-56.

LIU Xiangying. Research progress and prospects of intelligent mine ventilation[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(4): 44-56.



扫码移动阅读

driving intelligent decision-making systems toward a cloud-edge-device collaborative mode. ③ Building a digital twin-driven disaster evolution simulation platform, integrating dynamic evacuation path planning and rapid deployment of robot clusters, thereby forming a three-tier emergency response system of "disaster warning-regional isolation-intelligent rescue".

Key words: mine ventilation; intelligent ventilation; ventilation parameters; ventilation network calculation; ventilation disaster prevention and control

0 引言

矿井通风^[1]作为井工开采的基础,负责向井下作业人员输送新鲜空气、稀释有害气体。一旦通风网络出现风流紊乱,可能导致作业区域供风不足,既会引发人员窒息风险,还可能因瓦斯积聚或粉尘浓度超标诱发爆炸事故,威胁着作业人员的生命安全。通风是煤矿安全生产的基础,也是防火的重要手段。通风系统的设计旨在稀释并排出瓦斯等有害气体,维持适当的空气流动,从而减少火灾发生的可能性^[2]。

本文主要对矿井通风参数的智能监测技术、矿井通风网络实时解算方法、矿井通风灾变应急调控技术及矿井实现智能通风的架构方面的研究进行梳理,对矿井智能通风研究进展进行综述,以期为矿井通风灾害防控和智能化建设提供工作思路。

1 矿井通风参数监测技术

从矿井中快速准确地获取通风参数,从而实现
对通风设备和风网运行状态的感知,为实现风网的
实时解算和智能调控提供前提支持,是矿井通风的
关键内容^[3]。通风参数涵盖风量、风压、温湿度和灾
害气体浓度等要素。但这些参数会受到巷道断面变
化、风流交叉、障碍物、局部阻力及井下热湿环境等
因素的影响。实现通风参数的精准测量需突破三大
技术环节:抗干扰传感设备研发、最优布设方案设
计、多源数据融合优化。首先,设计适应井下高温高
湿高粉尘环境的抗干扰、性能稳定可靠的风速测量
传感器;然后,设计抗干扰布设方案,重点解决因局
部阻力突变引起的测量失真、传感器交叉干扰及动
态校准难题;最后,对通风参数进行优化处理,消除
复杂工况下的数据偏差,提升参数可靠性。

1.1 矿井通风参数检测设备

瓦斯浓度与风量/风压等动态参数是矿井通风系
统的核心监测指标,高精度测量数据是支撑通风网
络实时解算、异常诊断及智能调控的前提条件。传
感器网络的测量误差会传导至通风阻力计算与网络
解算环节,可能引发2类风险:误判通风系统状态导
致的调控延误;错误指令造成的瓦斯超限/火区蔓延
等次生灾害。因此开发抗干扰传感器已成为突破测

量精度瓶颈的关键研究方向。

瓦斯检测设备按原理主要分为光学类与电化学
类。光学类瓦斯传感器基于光与气体分子的相互作
用原理,通过检测光信号的变化反演瓦斯浓度,具有
精度高、抗电磁干扰、寿命长等优势,主要是基于可
调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser
Absorption Spectroscopy, TDLAS)、红外光谱(Fourier
Transform Infrared, FTIR)^[4-5]、调制波、光纤光栅等,
具体情况见表1。

表1 光学类瓦斯传感器技术

Table 1 Optical gas sensor technologies

传感器类型	检测限度/%	响应时间/s	适用场景
TDLAS	0.001~0.01	1~2	高精度定点/分布式监测
FTIR	0.1~1	5~10	便携设备/常规区域监测
光声光谱	0.000 1	<10	痕量气体实验室分析
光纤光栅	0.1~1	30~60	长期稳定分布式监测

丛琳^[6]采用 TDLAS 技术开发了多通道同步监
测系统,实现了井下 8 个测点的瓦斯浓度实时在线
检测。张雷等^[7]研制了基于 FTIR 的红外瓦斯传感
器,在瓦斯体积分数小于 22% 时,误差为 0.1%。戴
嫒等^[8]采用空芯光子晶体光纤作为载体,设计了非
本征 F-P 光纤传感器。李岩等^[9]分析了便携式甲烷
报警仪与光学瓦斯检测仪测定数值不一致的原因,
并针对性地提出光学瓦斯检测仪实测数据的修正公
式。付华等^[10]针对电化学传感器在低浓度(<1%CH₄)
检测中的非线性失真问题,创新性地将谐波检测与
恒温控制结合,使双回路系统的量程扩展至 0~
100%CH₄(全量程误差<±1.5%FS)。郭清华^[11]利用光
纤光路复用技术,结合气室自校正技术,研制了多光
路同步数据采集的分布式多点激光甲烷监测装置。

电化学类传感器通过检测瓦斯在电极表面氧化
还原反应产生的电流/电压信号^[12]实现浓度测量,具
有成本低、体积小、响应快等优势,但普遍存在寿命
较短、易受环境干扰等问题。按工作原理可分为恒
电位电解式、极限电流式、固体电解质式 3 类(技术
对比见表 2)。

崔媛媛^[15]利用贵金属掺杂作为增敏技术对
ZnO 进行表面修饰,并采用紫外光(Ultraviolet Light,

表 2 电化学式瓦斯传感器技术对比
Table 2 Comparison of electrochemical gas sensor technologies

传感器类型	检测原理	适用场景
恒电位电解式	甲烷在电极表面被氧化, 产生的电流与浓度成正比	便携式甲烷检测仪
极限电流式	甲烷通过多孔膜扩散到电极表面, 产生的电流与浓度呈线性关系	汽车尾气监测等工业高温环境
固体电解质式 ^[13-14]	甲烷与氧气反应生成CO ₂ 和H ₂ O, 引起电解质电势或电流变化	工业在线监测、高温高湿

UV)来提高 ZnO 的光催化活性,提高了 ZnO 对煤矿井下瓦斯的敏感性。付华等^[16]采用双差分检测技术,有效提取了瓦斯的微弱信号,解决了光路扰动问题,具有较高的精度和准确度。刘光迪^[17]自主研制了便携式高精度电化学探测装置,集成了实测精度高、稳定性强的CH₄检测探头。丁汀等^[18]针对瓦斯传感器单一监测数据不可靠的问题,基于局部敏感哈希孤立森林提出了一种融合煤矿多维时序数据的瓦斯异常检测算法。刘正杰^[19]设计了一种便于现场使用的微电子机械系统技术(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)甲烷传感器特性表征系统。

在风速测量方面,现代矿井风速测量技术已从传统机械式(叶轮/杯式)发展为非接触式感知,主要包括热式(热线/热膜)^[20-21]、光纤光栅式^[22-23]、超声波时差式^[24]3类。其中超声波式因无运动部件、量程宽成为主流通风监测方案。超声波测速技术按原理可分为时差法(双向传播时间差解算流速)^[25]、多普勒法(流体中粒子散射频移)、互相关法(上下游信号相似性分析)3种。

1.2 矿井通风参数测定方案

受矿井巷道断面、支护形式、局部阻力物的影响,最大风速不一定在轴线上,风速分布也不一定具有对称性,且在矿井巷道中流动的风流是连续不断的介质,所以为了准确测定矿井巷道横截面的平均风速,专家学者从传感器布置策略和风速测量方法2个方面进行研究。

目前研究最多的为时差法,即通过测量在顺风 and 逆风情况下超声波信号在传感器发射端和接收端之间传播的不同时间来进行通风参数测量。李新波等^[26]改进了发射端和接收端之间的空间位置信息,设计了正交布局,通过空间矢量合成实现了三维风速测量。刘小松等^[27]采用3个收发一体式超声波传感器互相发射超声波,构建了三角形传感器阵列,结合时差法建立风矢量测量模型。尹莘新^[28]根据三阵元系统结构特性,结合时差法通过直角四面体型传

感器簇建立风矢量测量模型,消除温湿度及阴影效应对风矢量测量的影响,测量误差小于0.1 m/s,满足矿井精准测风要求。单泽彪等^[29]提出了一种基于二次相关的互射式三阵元超声波测风方法,采用三阵元互射式阵列结构并结合二次相关的时延估计算法进行超声波传播时间测量,进而根据超声波传播时间与风速风向的关系得到风速风向值。

在传感器布置策略方面,张浪^[30]通过实测风速值确定了传感器的最佳布设位置。宋莹等^[31]提出用校正系数结合巷道断面任意点风速值来确定断面平均风速。Li Rongmao等^[32]提出了一种迁移学习策略,以提高杯式风速计数据驱动校正模型的泛化性能和准确性,从而降低二次训练数据的收集成本。针对风速传感器只能监测某一点的风速,而不能准确监测巷道断面平均风速的问题,李雪冰等^[33]建立了巷道断面上任一点时均风速和巷道断面平均风速的统计测量模型。赵丹等^[34]提出了一种宏观上风速传感器的最少全覆盖布点法。在此基础上,刘剑等^[35]基于邻域粗糙集的风速传感器优化布置模型,利用最少数量风速传感器实现对风速的有效监测,获得较高的故障诊断准确度。Liu Yujiao等^[36]提出了一个基于底层图的独立切割集的新概念,以确定传感器的最小数量和最佳布设位置。张浪等^[37]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风系统。卞欢等^[38]使用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)对实际巷道风流进行数值模拟,提出基于遗传算法优化BP神经网络的巷道平均风速单点测试模型。贾瞳等^[39]使用相继平均移动算法解决风流状态和巷道断面变化导致的风量测试值与实际风量间存在的误差。谢中朋^[40]通过Fluent模拟及现场实验得到了单、双机幕安装角与阻风性能的关系,为角联巷道风流控制提供了新方法。

1.3 矿井通风参数优化方法

受传感器精度的限制,测量数据与现场实际测量结果可能存在误差,不能为通风系统网络解算提供可靠数据。鉴此,国内外学者开始改进测量算法来处理异常数据。何敏^[41]提出了一种基于相对压力的煤矿通风阻力测定数据处理方法。倪景峰等^[42-43]提出基于随机森林链式方程多重插补法填补缺失数据,并提出了一种局部离群因子-高斯混合模型,实现风速数据清洗。张巍等^[44]利用模糊C均值、局部加权回归和S-G(Savitzky-Golay)滤波器等平滑降噪算法去除噪声的影响,获得最优数据。Gao Ke等^[45]采用遗传算法解决了通风阻力系数反演问题。沈志

远^[46]利用堆栈去噪自编码器(Stacked Denoised Autoencoder, SDAE)模型强大的特征提取及还原解析能力,构建了矿井风速数据清洗 SDAE 模型。郭金婷等^[47]通过环境传感器采集甲烷浓度、粉尘浓度和温度等数据,利用模拟退火算法优化 BP 神经网络计算风量与环境系数的最优目标,在保证安全的前提下,精准控制出风量。

1.4 矿井通风网络实时监测

随着开采规模和采深的不断增大,在井下复杂条件下,可能会有构造应力突变及热害等不可控因素导致风流参数波动,因此,对通风设备和风网状态参数的监测不可或缺,要实现对风速、湿度等通风参数的在线分析和动态预警,提高通风系统的研判能力。

在通风设施监测方面:高忠国等^[48]设计了一套基于云平台的矿井智能通风监测与控制系统,该系统连接井下智能监测与控制硬件设备,实现数据集成。王斌等^[49]研究了针对山东能源临矿集团王楼煤矿的智能通风系统优化,提出了基于总线技术的通风控制系统和基于 ZigBee 通风参数监控网络的单叶式自动风窗、百叶式自动风窗、抗火灾自动风门等方案。齐俊铭等^[50]基于专家系统,采用知识库与推理机相结合的方法建立矿井监控预警诊断系统,同时设计了风速、瓦斯、烟雾、CO 超限报警功能,并将风门开停、主要通风机负压预警诊断推理机集成到系统中。

在矿井通风系统监测方面:黄德^[51]提出一种基于多目标优化特征选择方法,用于通风阻力异常监测系统的传感器布设方案优化。雷洪波等^[52]构建了通风系统数据库并完成了数字化建模,通过关键部位数据的实时采集,结合隐患识别模型和通风网络解算方法,实现通风系统安全隐患的动态监测。Luo Wen 等^[53]利用单类支持向量机(One-Class SVM, OCSVM)构建了通风故障诊断模型,通过均匀超参数将故障诊断问题转换为最大决策边界问题,提升监测风速数据的分析效率。郭岳^[54]基于数字孪生技术构建了虚实映射模型,通过融合多源传感数据开发出风流智能调控决策系统,如图 1 所示。

井下恶劣环境中,粉尘、潮湿等因素容易干扰传感器,导致采集的数据存在噪声甚至缺失。局部区域的监测盲区可能使密闭巷道等关键节点的风速数据难以实时获取。现有传感器及测风方案虽基于矿井风流湍流特性设计,但新传感器的研发仍受制于采集频率与检测精度,这对测风方案和数据优化方案提出了更高要求。

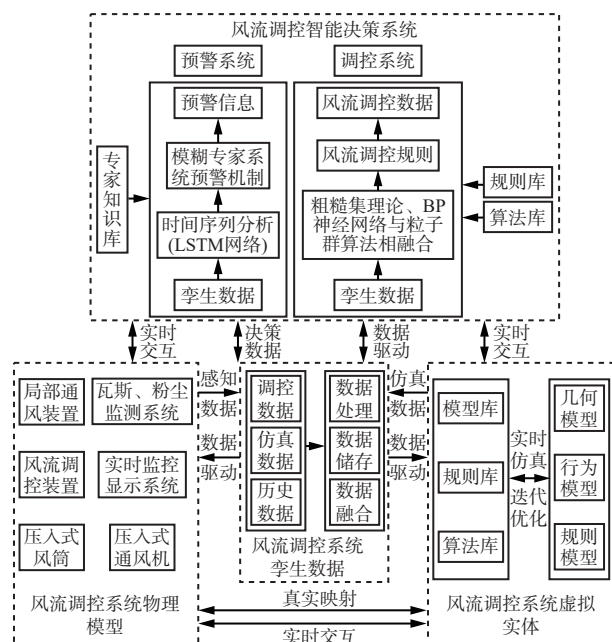


图 1 数字孪生风流调控系统

Fig. 1 Digital twin wind flow regulation system

2 矿井通风网络实时解算方法

矿井通风参数的精准获取是矿井智能通风的基础,所采集的数据本质上是物理空间的数字化映射,为实现通风智能调控,需将物理参数转换为网络拓扑结构的动态表征,即矿井通风网络实时解算方法。矿井通风网络实时解算是矿井通风的核心,因此,专家学者们针对通风网络解算方法进行了大量研究。

2.1 数值模拟求解方法

矿井数值模拟方法主要包括有限元法(Finite Element Method, FEM)、计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)及传热学方法。

FEM 在通风系统的结构和流体力学分析中得到广泛应用。吴奉亮等^[55]结合节点压力解算与采空区渗流场有限元分析,研究了矿井风网与采空区流场边界耦合模型的迭代求解流程。

CFD 适用于局部复杂区域的精细化模拟,通过建立流体力学控制方程并进行数值离散,可解析风流运动、传热及污染物扩散规律,但存在计算资源需求大的局限。张浪^[30]利用巷道测风站风速场 CFD 模型,实现了测风站内人员处于极端位置条件下巷道测风站风速场的定量模拟分析。姜黎明等^[56]采用 CFD 模拟与数值分析相结合的方法构建了以风量和转弯角度为自变量的巷道转弯区域局部阻力系数计算公式。

传热学方法通过研究空气的传热行为来改进通

风系统性能。李孔清等^[57]运用 CFD 模拟技术研究不同传热和散湿强度下通风阻力的变化规律。Jia Peng 等^[58]基于灵敏度理论对活动支路进行排序,并利用灵敏度衰减率理论和最小风量原理计算有效支路的调节范围。李伟等^[59]采用回路风量牛顿法求解通风网络风量和风向变化,采用迎风离散格式的有限差分法求解通风网络内风流传热-传质过程,提出了火灾时期全风网“节点-分支-网络”风量风质失效多物理场耦合解算方法。

部分学者基于 Windows 操作系统,结合 DBASE 数据库、Web GIS 及 ArcGis 技术开发了矿井通风系统解算软件。裴晓东等^[60]利用 Ventsim 软件建立了复杂通风网络三维可视化模型,但该类软件主要实现三维可视化功能,尚不具备实时智能解算能力。为此,国内外学者们提出新型解算方法。Zhong Deyun 等^[61]基于最小独立闭环原理开发了高效管网解决方法。Xu Gang 等^[62]结合通风调查结果与 Ventsim 软件,建立非线性优化标定算法。当前研究聚焦于热阻网络解算^[45]、拓扑结构优化^[63]、非线性传感器开发^[64]、测点布设优化^[35]及阻变故障诊断^[65]等方面。陈开岩等^[66]综合热对流、氧化放热与散热模型,耦合风量平衡与热湿平衡方程,提出了基于空气状态参数迭代的风量调控决策方法。

2.2 机器学习算法

随着机器学习算法的引入,矿井通风实时解算的灵活性和适应性显著增强。遗传算法^[23]和粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)^[67]通过模拟群体智能行为实现快速寻优,在多目标优化场景中展现优势,已成功应用于风量分配与通风机参数动态调整^[68-69]。Liu Jianghai^[70]通过遗传算法优化 BP 神经网络参数,实现最优通风效率预测。P. Kumar 等^[67]研发了自适应神经模糊界面系统和遗传算法的融合模型,用于预测矿井通风能耗和气流分布,通过对比 PSO 和贝叶斯优化算法,验证了遗传算法在神经网络超参数优化中的有效性。赵丹等^[71]深入分析了不平衡样本集对通风系统故障诊断的影响,并采用随机森林集成学习方法,提升了通风系统分支故障的诊断精度。

现有优化算法存在决策过程不透明的问题,导致工程师对关键控制指令缺乏信任。在安全与能耗的平衡决策中,易受局部最优解影响而采取次优策略,且缺乏决策逻辑的可解释性。

数据驱动的机器学习方法逐渐成为研究热点。基于历史数据训练得到的神经网络与深度学习模型可快速预测风量、风压的分布并提升计算效率。长

短期记忆网络凭借时序数据的高效处理能力,已应用于通风动态预测,能够通过局部监测数据推断未知区域气流状态^[72]。

矿井通风网络的实时解算依赖大规模非线性方程组的快速求解,风阻模型和湍流效应的高精度模拟需要消耗大量计算资源。传统数值方法虽精度较高,但难以满足火灾、煤与瓦斯突出等动态场景的秒级响应要求。矿井通风网络的动态特性导致拓扑结构频繁变化,传统静态模型难以快速重构参数,机器学习模型在未知扰动下易出现预测偏差,现有算法在泛化能力与实时训练效率方面仍需提升。

3 通风灾变应急调控技术

矿井通风网络实时解算方法能够完成常规工况下的网络状态监测,但在瓦斯突出、火灾等灾变工况下,因拓扑结构改变难以有效应对动态风险。突发事故导致气流紊乱、有毒有害气体扩散、网络结构瞬时重构等多重冲击。这种动态失衡状态不仅考验通风系统的抗灾韧性,更对灾害条件下的应急决策机制提出了更高要求:如何在分钟级时间窗口内重构通风路径、控制污染扩散并保障避灾路线畅通,已成为现代矿山应急救援体系的核心技术挑战。

通过融合物联网感知、数字孪生仿真与智能决策算法构建的通风异常诊断和调控技术,不仅能实时捕捉灾变信号,更能通过多目标优化算法快速生成最优调控方案,这是下一阶段需要深入探讨的技术重点。

3.1 矿井通风异常诊断技术

矿井通风系统的稳定运行是煤矿安全生产的重要保障。开发高效可靠的通风异常诊断技术已成为学术界关注的重点,通过优化诊断方法可显著提升故障识别精度与响应速度。

在通风设备故障诊断方面:随着信息技术的发展,学者引入通风设备监测和诊断系统,可对通风机的参数和状态进行监测。龚晓燕等^[73]通过可辨识矩阵和区分函数对故障信息系统进行属性约简,构建基于最小决策表的局部通风设备诊断库。

在通风系统故障诊断方面:刘剑等^[35,74]提出了基于最小欧氏距离的无需样本的无监督诊断模型和基于支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的双输出故障诊断模型,SVM 分支风量为输入,输出为故障分支编号和故障等效风阻参数。张浪等^[75]、赵丹等^[76]使用随机森林(Random Forest, RF)模型进行故障分支诊断。

在故障位置溯源方法方面:罗永豪^[77]提出了通

风系统实时诊断理论,能够识别调节风门异常、通风机负压减小等4种事故状态。曹勇等^[78]采用示踪气体技术实现复杂通风网络漏风区域精准定位。蒋成龙^[79]通过矿井三维井巷模型,构建了通风系统故障的界定规则与故障溯源模型。

在故障检测系统方面:魏连江等^[80]研发了矿井智能通风与灾变应急决策平台,集成实时解算、异常诊断和灾情研判功能。郭炜舟等^[81]开发了管控系统,具备风量实时监测与远程调控功能。张永昌^[24]将人工智能技术与矿井通风网络监测、预警与决策方法有机融合,开展了井巷风速智能校正、通风网络监测系统优化选址、通风网络异常智能诊断及应急智能调控研究。

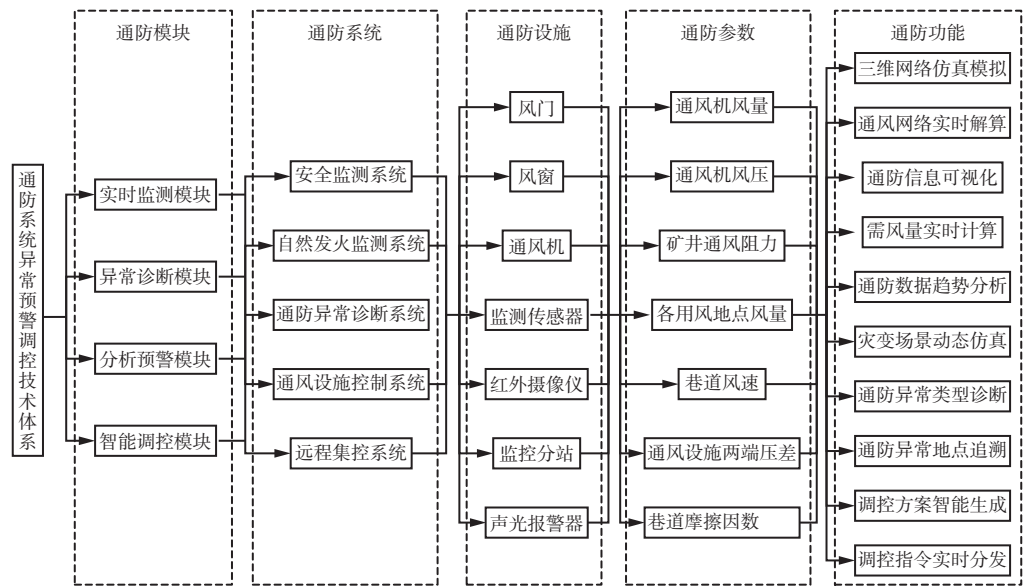


图2 矿井通风系统异常预警指标体系

Fig. 2 Anomaly regulation framework for intelligent mine ventilation

在矿井通风智能调控方面:针对矿井通风网络优化调控非线性模型求解困难的问题,钟德云等^[82]在改进两步骤通风优化方法的基础上,提出了混合整数规划的双阶段风流调控优化数学模型。王磊等^[83]提出2种通风联动调控方式,即常态下变频调风和异常情况下调控排风:在常态下通过供需匹配分析确定通风机运行频率,实现通风机的智能变频调风;在通风异常情况下,采用4种调控排风规则,保障长距离掘进工作面的通风安全。王凯等^[84]分析了风量供需匹配原理与联动调控方法,建立了多元特征融合的主要通风机调频、关联分支调阻及联合调节的数学模型,提出了通风网络分支供需匹配调控模型和稳定性判定方法。裴晓东等^[60]根据不同火源位置的烟流演化规律,提出一种能够同时满足排烟风量和采场风量需求的火灾风烟流应急联动调控方案。吴新忠等^[85]提出一种基于多策略融合麻雀搜

3.2 矿井智能通风异常调控技术

矿井智能通风通过智能控制实现按需供风,在保障矿井正常通风的同时,具备灾变时期风流智能调控的能力。其技术架构是将信息采集处理、智能控制与通风系统深度融合,按照“平战结合”理念构建智能决策体系,实现常态供风优化与灾变应急调控的有机统一。矿井智能通风异常调控技术体系涵盖通风模块、通防系统、通防设施、通防参数、通防功能等内容,如图2所示。通过实时监测、分析预警、异常诊断、智能调控等4个模块构建安全监测、自然发火监测、通防异常诊断、通风设施控制、远程集控等5个系统,通过通风设施获取通防参数,实现通防异常地点追溯、灾变场景动态仿真等功能。

索算法的矿井风流智能调控方法。Li Junqiao等^[86]提出一种新的裸粒子群优化算法,实现矿井通风智能决策。邢永亮等^[87]探讨了通风网络优化的按需通风、灾变通风决策的智能化、智能通风辅助决策平台等通风集成技术。范京道等^[88]提出了基于一张图的智能态势分析与决策方法。

当前诊断模型多依赖历史数据训练,灾变时期的通风紊乱可能导致传统模型的预测失效。此外,受限于小样本异常数据,模型训练不充分,难以覆盖所有潜在风险场景。若缺乏在线学习机制,模型无法动态适应井下环境的持续变化,可能漏检未知类型的重大隐患。

4 矿井智能通风系统架构

智能通风系统作为传统通风理论与现代信息技术的深度融合载体,核心目标在于实现动态感知-自

主决策-精准执行的闭环控制。当前智能通风系统普遍采用“感知层-传输层-决策层-执行层”4层架构,虽各系统在层级功能配置上各有侧重,但整体上遵循着“感知-决策-执行”闭环控制逻辑,如图3所示。

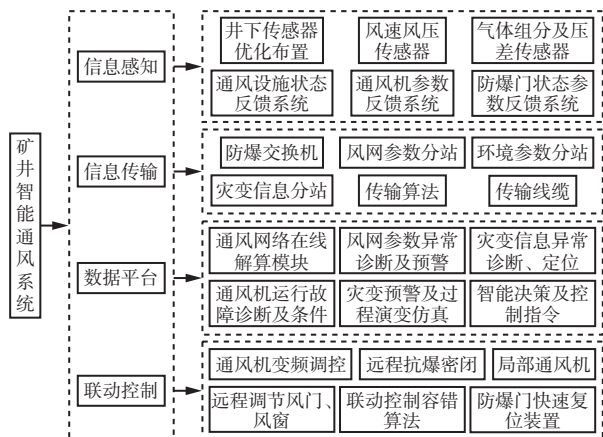


图3 矿井智能通风系统架构

Fig. 3 System architecture of intelligent mine ventilation

1) 感知层作为通风系统的前端数据采集核心,其数据采集方式正从单一参数监测向多模态传感网络集成方向发展。通过部署瓦斯、风速、温湿度、粉尘等传感器及设备状态监测单元,实时获取井下气体浓度、风流速度、环境温湿度等关键参数,同步监测通风机电流、风门开闭等设备运行信息,并借助有线或无线网络将数据实时传输至监控中心,为瓦斯超限预警、火灾预判与通风智能调控提供基础数据支撑。该层不仅具备异常报警和风量自动调节等功能,还能通过多源信息融合支撑智能化通风决策,是矿井安全防控体系的核心环节。随着无线自组网、边缘计算等技术的融合应用,感知层正向高效、智能方向持续演进。

2) 传输层作为井下感知设备与地面控制中心的中枢链路,采用光纤、工业以太网等有线传输与5G/WiFi/LoRa等无线通信技术,将感知层采集的气体浓度、风速、设备状态等数据实时、可靠地传输至监控平台,同时将控制指令下发至执行设备。其设计需满足井下复杂工况需求,具备强抗干扰、低时延、多重冗余等特性,支持多协议转换与端到端数据加密,保障通信安全。传输层为实时监控、远程调控及智能决策提供稳定数据通道,是灾害预警与动态调风的基础,5G网络切片与边缘计算等技术正推动矿井通风系统向高效、智能方向升级。

3) 决策层作为智能通风系统的控制中枢,通过解析感知层上传的井下环境数据和设备状态,结合数字孪生、AI算法等生成通风调控策略,协调执行

层完成指令下发、实现精准控制。其功能涵盖实时风险预警、能效优化、人机协同决策及系统自适应学习。该层级既保障井下作业安全、预防重大事故,又通过精细化控制降低能耗,推动煤矿通风从被动响应向主动预判升级,是智能化矿山建设的关键技术支撑。

4) 执行层是智能通风系统的终端执行单元,通过将决策层的指令转换为通风机调速、风门开关等物理动作,直接调控井下风流分布与设备运行。其核心功能包括接收并执行指令、控制通风设备、联动应急操作、实时反馈执行状态。通过冗余设计和防爆技术保障井下恶劣工况下的运行可靠性与安全性。执行层作为通风系统从“智能决策”到“实际调控”的落地环节,直接影响通风效果。

王凯等^[84]、王振平等^[89]开发的智能通风管控系统,集成了监测、自动化、远程控制等功能。毛善君等^[90]研发了基于4DGIS的矿区智能云平台,构建大数据决策支持子平台及4DGIS协同控制平台。范京道等^[88]通过通风参数的在线实时监测,感知井下不同区域通风状态,依据在线风网解算结果及《煤矿安全规程》要求,进行通风设施的智能调控。王国法等^[91]开发的“煤科云”智能一体化管控平台实现了设备标准化接入、数据融合与智能管控,集成了监测、运输及园区管理子系统。

5 总结与展望

在矿井通风中,智能监测是基础,动态控制是核心,应急调控是底线:需构建“监测-预测-控制-救援”全链条技术生态。当前矿井智能通风系统架构已从早期的单机自动化向“全域感知-自主决策-协同执行”的体系化方向演进,未来需进一步突破数字孪生、边缘智能、多Agent协同等技术,以提升系统响应速度、复杂环境适应性与可靠性,推动通风系统向真正意义上的“矿山自主呼吸系统”进化。

5.1 待解决的问题

1) 现有通风参数检测装置在稳定性和准确率方面存在不足,导致系统难以实现秒级响应与精准调控。在矿井通风参数的快速准确获取中,普通传感器在井下潮湿、粉尘弥漫的环境中极易失效,风速仪被煤尘覆盖后读数偏差超过30%、巷道拐弯或深部区域无线信号时断时续、低风速区域(盲巷)的检测误差常达0.3 m/s以上,难以预警瓦斯积聚;不同系统采集的数据孤立存储,突发漏风时无法快速关联分析。目前,现场部署防爆型激光传感器和5G+光纤混合网络,但单台设备成本超5万元,且不同厂商设

备协议不兼容,仍需人工抄表补录数据。亟需低成本、模块化设备与数据平台,才能实现通风系统的秒级响应与精准调控。

2) 矿井环境的高度不确定性与人机协同决策自动化水平低下,制约着通风网络的自适应优化能力。在煤矿通风网络自适应优化方面,地质条件突变、生产活动干扰及环境参数波动等动态环境的不确定性要求系统具备快速响应能力,但复杂的通风网络建模因非线性流体力学关系、大规模拓扑结构及参数标定误差而难以精准描述实际工况;多目标优化需在安全性、响应速度、可靠性等冲突目标间动态权衡,而实时性约束与有限算力、边缘设备性能不足、预测模型失效等因素进一步加剧了优化难度;此外,通风网络自适应优化要求应对设备故障、冗余设计矛盾及应急切换机制等风险,同时人机协同需解决自动化决策的可解释性、设计人工干预接口。这些因素共同构成通风网络动态优化的核心障碍,需通过算法创新与工程实践协同突破。

3) 火与瓦斯复合灾害的实时辨识技术尚未突破,限制了灾害工况下的应急通风调控效能。矿井通风应急调控技术的核心目标是保障井下安全,当前虽能通过传感器网络识别风速超限、风流短路、风路阻塞等常规隐患,但对火与瓦斯复合灾害的实时判别仍存在严重技术瓶颈。因此,通风网络决策必须深度融合灾害演化机制:需构建瓦斯渗流-通风压力-岩层应力耦合的多物理场耦合模型,研发基于微震监测、红外热成像和气体组分谱分析的超前预警技术;同时部署边缘计算节点,在井下迅速完成火灾烟流扩散路径预测,联动调控风门、防爆墙与灭火装置,形成“感知-预测-隔离”的全链条防控体系,方能在短时间内遏制灾害升级。

5.2 研究展望

1) 加强通风多参数精准动态感知。矿井通风系统的智能化升级首先依赖于感知技术的突破,需重点研发抗干扰纳米气敏传感器、光纤分布式测温装置等高精度传感设备,提高粉尘与电磁干扰下的测量精度,并推动多参数融合智能节点的应用,实现瓦斯、氧气、温湿度等六维参数的同步采集。同时,应构建“固定+移动”结合的时空动态监测网络,利用数字孪生技术优化虚拟测风站布局,结合移动机器人搭载激光雷达实现全域覆盖。此外,需通过联邦学习框架实现边缘节点数据互校验,从数据源头提升监测可信度,为通风系统提供精准可靠的实时数据支撑。

2) 加强通风系统智能决策体系建设。智能决策

体系需从单机计算向云边端协同方向演进。基于数字孪生技术构建通风网络超实时仿真模型,集成CFD与离散元耦合算法,实现瓦斯运移、粉尘扩散等复杂过程的高保真模拟,并通过数字线程技术保证虚实系统的毫秒级同步。进一步开发分布式多Agent协同架构,利用强化学习与博弈论实现局部决策优化与全局策略融合,形成分钟级风量自适应分配能力。同时,部署边缘智能网关与轻量化AI芯片,支持本地化实时计算与低带宽环境下的快速响应,推动决策效率从“分钟级”向“秒级”跨越。

3) 韧性应急调控体系的自主化构建。通风调控需从常规控制向自主应急联动升级。研发通风网络参数自校正算法与深度网络协同控制策略,实现异常工况下的风量自平衡与多系统联动优化。构建基于数字孪生的灾害推演平台,动态生成逃生路径与应急预案,并部署救援机器人集群快速构筑应急风障,形成“预警-隔离-救援”三级响应链。同时,通过设备数字健康管理体系预测设备寿命,采用TSN(Time-Sensitive Networking)+5G混合组网保障指令传输可靠性,提升系统可用性,确保极端条件下的调控稳定性。

参考文献(References):

- [1] 张国枢. 通风安全学[M]. 2版, 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
ZHANG Guoshu. Ventilation safety[M]. 2nd ed. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2000.
- [2] 邓军, 李鑫, 王凯, 等. 矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 154-177.
DENG Jun, LI Xin, WANG Kai, et al. Research progress and prospect of mine fire intelligent monitoring and early warning technology in recent 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 154-177.
- [3] 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.
- [4] LI Yafei, MA Yanming, ZHENG Chuantao, et al. Near-infrared wide-range dual-gas sensor system for simultaneous detection of methane and carbon monoxide in coal mine environment[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024, 307. DOI: 10.1016/j.saa.2023.123581.
- [5] LIANG Yuntao, WANG Jincheng, TIAN Fuchao, et al. A novel temperature compensation approach of IR gas

- sensors in coal mines[J]. *Fuel*, 2023, 354. DOI: [10.1016/j.fuel.2023.129330](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129330).
- [6] 丛琳. 煤矿井下钻孔内瓦斯浓度监测传感器研制[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 150-155.
CONG Lin. Development of a methane concentration monitoring sensor in underground boreholes of coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 150-155.
- [7] 张雷, 尹王保, 董磊, 等. 基于红外光谱吸收原理的红外瓦斯传感器的实验[J]. *煤炭学报*, 2006(4): 480-483.
ZHANG Lei, YIN Wangbao, DONG Lei, et al. Experimental of an infrared gas sensor based on infrared absorption spectrum theory in laboratory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006(4): 480-483.
- [8] 戴嫒, 周孟然, 王波, 等. 非本征 F-P 传感器在瓦斯检测系统中的应用[J]. *工矿自动化*, 2014, 40(8): 91-94.
DAI Hua, ZHOU Mengran, WANG Bo, et al. Application of extrinsic F-P sensor in gas detection system[J]. *Industry and Mine Automation*, 2014, 40(8): 91-94.
- [9] 李岩, 郭寿松. 两种瓦斯检测仪器在庞庞塔煤矿上隅角测定数值不一致的原因分析[J]. *矿业安全与环保*, 2014, 41(1): 57-59, 62.
LI Yan, GUO Shousong. Cause analysis on inconsistent measuring data with two gas detectors at upper corner angle in Pangpangta Coal Mine[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2014, 41(1): 57-59, 62.
- [10] 付华, 司南楠, 鲁俊杰. 基于恒温谐波检测双回路瓦斯浓度仪研究[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(10): 1493-1499.
FU Hua, SI Nannan, LU Junjie. Study on dual-circuits gas detector based on constant temperature and harmonic detection[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(10): 1493-1499.
- [11] 郭清华. 煤矿动力灾害前兆信息传感技术发展与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(11): 76-83.
GUO Qinghua. Development and application of precursory information sensing technology in coal mine dynamic disaster[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(11): 76-83.
- [12] CHENG Li, SUN Ming, WANG Shuyan. Analysis on dynamic characteristics of corona discharge in low concentration methane-air mixture at micro-nano scale[C]. The 8th International Conference on Smart Grid and Smart Cities, Shanghai, 2024. DOI: [10.1109/ICSGSC62639.2024.10813932](https://doi.org/10.1109/ICSGSC62639.2024.10813932).
- [13] WANG Luyu, SONG Jia, RUAN Chenghai, et al. MoS₂ based dual mine gas disaster sensor that operates at room temperature[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 359. DOI: [10.1016/j.sna.2023.114517](https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114517).
- [14] ZHU Wenyuan, WANG Pengtao, XIE Kun, et al. First-principles study of the adsorption and sensing properties of transition metal-modified CrSe₂ for CH₄, H₂S, and CO[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 708. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2024.136006](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136006).
- [15] 崔媛媛. UV 光激发下贵金属对 ZnO 基瓦斯传感器的增敏效应研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.
CUI Yuanyuan. Study on sensitization effect of precious metals on ZnO-based gas sensor under UV light excitation[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2022.
- [16] 付华, 杨羲葵, 刘宇佳. 双差分法检测瓦斯含量新技术的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(7): 1161-1164.
FU Hua, YANG Yikui, LIU Yujia. Experiment study on new technology of methane content measurement by dual difference[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(7): 1161-1164.
- [17] 刘光迪. 煤矿隐蔽致灾地质因素高精度地电化学探测装置及综合解释技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
LIU Guangdi. Study on high-precision electrochemical detection device and comprehensive interpretation technology of hidden geological factors causing disasters in coal mines[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [18] 丁汀, 颜登程, 张以文, 等. 融合煤矿多维时序数据的瓦斯异常检测算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(6): 1651-1659.
DING Ting, YAN Dengcheng, ZHANG Yiwen, et al. Gas anomaly detection algorithm merged with coal multi-dimensional time series data[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(6): 1651-1659.
- [19] 刘正杰. MEMS 甲烷传感器特性表征系统的设计与实现[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LIU Zhengjie. Design and implementation of MEMS methane sensor characteristic characterization system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [20] 李东升. 低风高精度热式风速传感器设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
LI Dongsheng. Design of low wind and high precision thermal wind speed sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019.
- [21] 王尚. 温度平衡模式 MEMS 热式风速风向传感器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
WANG Shang. Research on MEMS thermal wind speed and direction sensor with temperature balance mode[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [22] 王纪强, 李振, 孟辉, 等. 矿用光纤热线式风速传感器设计[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(5): 30-34.
WANG Jiqiang, LI Zhen, MENG Hui, et al. Design of mine-used hot-wire-based optical fiber wind speed sensor[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(5): 30-34.
- [23] 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.
- [24] 张永昌. 矿井通风参数监测智能优化与通风网络响应智能诊断[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHANG Yongchang. Intelligent optimization of mine ventilation parameter monitoring and intelligent diagnosis of ventilation network response[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [25] 丁果. 基于空气耦合超声传感器的气体流量计研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- DING Guo. Research and design of gas flowmeter based on air coupled ultrasonic sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [26] 李新波, 朱阁彦, 李厚禹, 等. 三维超声阵列风速风向测量方法[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(9): 70-78.
- LI Xinbo, ZHU Geyan, LI Houyu, et al. A method for measuring wind velocity and direction with three-dimensional ultrasound array[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(9): 70-78.
- [27] 刘小松, 解晓冉, 单泽彪, 等. 基于互射式三阵元超声波传感器的风矢量测量[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(9): 411-417.
- LIU Xiaosong, XIE Xiaoran, SHAN Zebiao, et al. Wind vector measurement based on three mutually transmitting ultrasonic sensors[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2023, 44(9): 411-417.
- [28] 尹莘新. 基于时差法的声发射源定位方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- YIN Shenxin. Research on acoustic emission source location method based on time difference method[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [29] 单泽彪, 解晓冉, 刘小松, 等. 互射式三阵元超声波传感器的二次相关测风方法[J]. *电子学报*, 2023, 51(9): 2428-2436.
- SHAN Zebiao, XIE Xiaoran, LIU Xiaosong, et al. Wind measurement with three mutually transmitting ultrasonic sensors based on quadratic correlation method[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(9): 2428-2436.
- [30] 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.
- [31] 宋莹, 李雪冰, 王施惠, 等. 基于 LDA 的矩形巷道测风站风速测定与校正实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(1): 169-175.
- SONG Ying, LI Xuebing, WANG Shihui, et al. Experimental study on determination and correction method of wind speed in wind station of rectangular roadway based on LDA[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(1): 169-175.
- [32] LI Rongmao, KIKUMOTO H, JIA Hongyuan, et al. Transfer learning strategy for data-driven correction of wind measurement around buildings using cup anemometers[J]. *Building and Environment*, 20, 241. DOI: [10.1016/j.buildenv.2023.110499](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110499).
- [33] 李雪冰, 刘剑, 秦洪岩, 等. 湍流脉动影响下巷道平均风速单点统计测量方法[J]. *华北科技学院学报*, 2018, 15(2): 1-9.
- LI Xuebing, LIU Jian, QIN Hongyan, et al. Method for air velocity measurement with single-point under the influence of turbulent fluctuation[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2018, 15(2): 1-9.
- [34] 赵丹, 潘竞涛. 改进灵敏度矩阵的矿井通风故障源诊断及传感器布置研究[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(2): 78-84.
- ZHAO Dan, PAN Jingtao. Fault source diagnosis for mine ventilation based on improved sensitivity matrix and its wind speed sensor setting[J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(2): 78-84.
- [35] 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.
- [36] LIU Yujiao, LIU Zeyi, GAO Ke, et al. Efficient graphical algorithm of sensor distribution and air volume reconstruction for a smart mine ventilation network[J]. *Sensors*, 2022, 22(6). DOI: [10.3390/s22062096](https://doi.org/10.3390/s22062096).
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 贾瞳, 马恒, 高科. 基于相继平均移动法通风网络全局风量优化[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 412-419.
- JIA Tong, MA Heng, GAO Ke. Global optimization adjustment of ventilation network based on successive average moving method[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2023, 42(4): 412-419.
- [40] 谢中朋. 复杂矿井通风系统稳定性研究[D]. 北京: 中

- 国矿业大学(北京), 2015.
- XIE Zhongpeng. Study on stability of complex mine ventilation system[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2015.
- [41] 何敏. 基于相对压力的煤矿通风阻力测定数据处理方法[J]. 工矿自动化, 2019, 45(11): 1-4, 48.
- HE Min. Data processing method of coal mine ventilation resistance measurement based on relative pressure[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(11): 1-4, 48.
- [42] 倪景峰, 刘雪峰, 邓立军. 矿井通风参数缺失数据插补方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2315-2323.
- NI Jingfeng, LIU Xuefeng, DENG Lijun. Method for filling missing data of mine ventilation parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2315-2323.
- [43] NI Jingfeng, YANG Shengya, LIU Yujiao. Data cleaning model of mine wind speed sensor based on LOF-GMM and SGAIN[J]. Applied Sciences, 2025, 15(4). DOI: [10.3390/app15041801](https://doi.org/10.3390/app15041801).
- [44] 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.
- [45] GAO Ke, DENG Lijun, LIU Jian, et al. Study on mine ventilation resistance coefficient inversion based on genetic algorithm[J]. Archives of Mining Sciences, 2018, 63(4): 813-826.
- [46] 沈志远. 面向不平衡数据集的矿井通风系统阻变故障诊断算法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- SHEN Zhiyuan. Research on algorithm for fault diagnosis of mine ventilation system windage alteration for imbalanced data set [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [47] 郭金婷, 汪广明, 汪文元, 等. 基于神经网络算法的井下通风监测与控制系统[J]. 工矿自动化, 2024, 50(增刊 2): 29-32.
- GUO Jinting, WANG Guangming, WANG Wenyuan, et al. Underground ventilation monitoring and control system based on neural network algorithm[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(S2): 29-32.
- [48] 高忠国, 温国惠, 高建新, 等. 基于云平台的矿井智能通风监测与控制系统设计[J]. 矿山机械, 2023, 51(11): 64-70.
- GAO Zhongguo, WEN Guohui, GAO Jianxin, et al. Design of intelligent ventilation monitoring and control system for mines based on cloud platform[J]. Mining & Processing Equipment, 2023, 51(11): 64-70.
- [49] 王斌, 王永宝, 郝继宝, 等. 王楼煤矿智能通风系统优化[J]. 煤矿安全, 2019, 50(2): 105-108.
- WANG Bin, WANG Yongbao, HAO Jibao, et al. Optimization of intelligent ventilation system in Wanglou Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(2): 105-108.
- [50] 齐俊铭, 王凯, 王志静, 等. 转龙湾煤矿矿井智能化通风系统与信息平台构建[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 212-220.
- QI Junming, WANG Kai, WANG Zhijing, et al. Construction of mine intelligent ventilation and prevention system and information platform for Zhuanlongwan Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 212-220.
- [51] 黄德. 矿井通风网络阻变辨识智能算法及观测点优化布设研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
- HUANG De. Research on intelligent algorithm of mine ventilation network resistance change identification and optimal layout of observation points[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [52] 雷洪波, 赵吉玉. 打通一矿通风系统隐患排查与智能监控研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(8): 106-109.
- LEI Hongbo, ZHAO Jiyu. Study on hidden trouble investigation and intelligent monitoring of ventilation system in Datong No. 1 Mine[J]. Coal Technology, 2019, 38(8): 106-109.
- [53] LUO Wen, ZHAO Youxin. One-class classification model for intelligent fault diagnosis of mine ventilation systems[J]. Scientific Reports, 2024. DOI: [10.1038/s41598-024-73527-0](https://doi.org/10.1038/s41598-024-73527-0).
- [54] 郭岳. 基于数字孪生技术的矿井风流调控虚拟系统设计与开发[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- GUO Yue. Design and development of virtual system for mine airflow regulation based on digital twinning technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [55] 吴奉亮, 高亚超, 常心坦. 矿井风网与采空区流场边界耦合模型与求解技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2333-2342.
- WU Fengliang, GAO Yachao, CHANG Xintan. Boundary coupling model and solution technology of mine ventilation network and gob flow field[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2020, 51(8): 2333-2342.
- [56] 姜黎明, 刘彦青, 赵灿. 巷道转弯区域流场特征及局部通风阻力系数计算研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 95-102.
- JIANG Liming, LIU Yanqing, ZHAO Can. Study on flow field characteristics and calculation of local ventilation resistance coefficient for turning areas of roadway[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 95-102.
- [57] 李孔清, 邹声华, 张砥. 巷道内传质对通风阻力的影响[J]. 应用力学学报, 2016, 33(2): 358-364, 380.
- LI Kongqing, ZOU Shenghua, ZHANG Chi. Pressure drop due to mass transfer in the tunnels[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(2): 358-364, 380.

- [58] JIA Peng, JIA Jinzhang, SONG Lei, et al. Theory of RPOD adjustment of air volume for mine intelligent ventilation[J]. *International Journal of Ventilation*, 2022, 21(4): 316-329.
- [59] 李伟, 刘彦青, 张浪. 外因火灾通风网络风量风质失效模型与数值解算方法[J/OL]. *煤炭科学技术*: 1-18. [2025-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.240.td.20240521.0838.00.html>.
- LI Wei, LIU Yanqing, ZHANG Lang. Model and numerical solution method the failure of air volume and air flow components in the ventilation network during the period of external fire[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1-18 [2025-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.240.td.20240521.0838.00.html>.
- [60] 裴晓东, 郝海清, 王凯, 等. 矿井复杂风网火灾风烟流应急调控技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(5): 124-132.
- PEI Xiaodong, HAO Haiqing, WANG Kai, et al. Research and application of fire air and smoke flow emergency control technology for mine complex ventilation network[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(5): 124-132.
- [61] ZHONG Deyun, WANG Liguang, WANG Jinmiao, et al. An efficient mine ventilation solution method based on minimum independent closed loops[J]. *Energies*, 2020, 13(22). DOI: [10.3390/en13225862](https://doi.org/10.3390/en13225862).
- [62] XU Guang, HUANG Jinxin, NIE Baisheng, et al. Calibration of mine ventilation network models using the non-linear optimization algorithm[J]. *Energies*, 2018, 11(1). DOI: [10.3390/en11010031](https://doi.org/10.3390/en11010031).
- [63] 李潭. 复杂矿井通风系统网络拓扑结构优化及评估应用[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2023.
- LI Tan. Topological structure optimization and evaluation application of complex mine ventilation system network[D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2023.
- [64] LI Junqiao, LI Yucheng, ZHANG Jing, et al. Accurate and real-time network calculation for mine ventilation without wind resistance measurement[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 230. DOI: [10.1016/j.jweia.2022.105183](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105183).
- [65] DONG Wang, JIAN Liu, DENG Lijun, et al. A supervised diagnostic experiment of resistance variable multifault locations in a mine ventilation system[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1). DOI: [10.1038/s41598-023-32530-7](https://doi.org/10.1038/s41598-023-32530-7).
- [66] 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.
- [67] KUMAR P, HATI A S, KUMAR P. An adaptive neural fuzzy interface structure optimisation for prediction of energy consumption and airflow of a ventilation system[J]. *Applied Energy*, 2023, 337. DOI: [10.1016/j.apenergy.2023.120879](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120879).
- [68] CHEN Sihao, DING Puxian, ZHOU Guang, et al. A novel machine learning-based model predictive control framework for improving the energy efficiency of air-conditioning systems[J]. *Energy and Buildings*, 2023, 294. DOI: [10.1016/j.enbuild.2023.113258](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113258).
- [69] FU Hua, SHU Dandan, KANG Haichao, et al. Hybrid optimization model and its application in prediction of gas emission[J]. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 2012, 18(3): 280-284.
- [70] LIU Jianghai. Design of mine ventilation system based on BP neural network optimized by GA[C]. *The 8th International Conference on Information Systems Engineering*, Dalian, 2023: 362-365.
- [71] 赵丹, 沈志远, 宋子豪. 面向不平衡数据集的矿井通风系统智能故障诊断[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(11): 4112-4123.
- ZHAO Dan, SHEN Zhiyuan, SONG Zihao. Intelligent fault diagnosis of mine ventilation system for imbalanced data sets[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4112-4123.
- [72] TANG Wenxuan, ZHANG Qilong, CHEN Yin, et al. An intelligent airflow perception model for metal mines based on CNN-LSTM architecture[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 187: 1234-1247.
- [73] 龚晓燕, 杨晓勇. 矿井局部通风设备系统故障诊断规则[J]. *煤炭科学技术*, 2006, 34(7): 23-25, 29.
- GONG Xiaoyan, YANG Xiaoyong. Research on fault diagnostics law of mine local ventilation equipment system[J]. *Coal Science and Technology*, 2006, 34(7): 23-25, 29.
- [74] 刘剑, 尹昌胜, 黄德, 等. 矿井通风阻变型故障复合特征无监督机器学习模型[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3157-3165.
- LIU Jian, YIN Changsheng, HUANG De, et al. Unsupervised machine learning model for resistance variant fault diagnosis of mine ventilation system with composite features[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3157-3165.
- [75] 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.
- [76] 赵丹, 沈志远, 刘晓青. 基于 OCISVM 的矿井通风系统在线故障诊断[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(10): 76-82.
- ZHAO Dan, SHEN Zhiyuan, LIU Xiaoqing. Online fault diagnosis of mine ventilation system based on

- OCISVM[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(10): 76-82.
- [77] 罗永豪. 巷道断面风速分布与煤矿通风系统实时诊断理论研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- LUO Yonghao. Study on wind speed distribution in roadway section and real-time diagnosis theory of coal mine ventilation system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [78] 曹勇, 张晓明, 佐佐木久郎, 等. 示踪气体诊断井下风流实态及弥散系数测定[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 165-169.
- CAO Yong, ZHANG Xiaoming, SASAKI Kyuro, et al. Measurement of gas flow state and dispersion coefficient in diagnosis of underground gas[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2017, 36(2): 165-169.
- [79] 蒋成龙. 基于三维监控模型的通风参数监测优化与通风系统故障溯源研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- JIANG Chenglong. Research on monitoring optimization of ventilation parameters and fault tracing of ventilation system based on monitoring system[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022.
- [80] 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.
- [81] 郭炜舟, 沈斌, 汪洋, 等. 葫芦素煤矿智能通风系统建设与应用[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 233-238.
- GUO Weizhou, SHEN Bin, WANG Yang, et al. Construction and application of intelligent ventilation system in Hulusu Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 233-238.
- [82] 钟德云, 文历学, 王李管. 基于混合整数规划的风流两步骤调控优化方法[J]. 黄金科学技术, 2024, 32(2): 356-365.
- ZHONG Deyun, WEN Lixue, WANG Liguang. Two-step optimization method for airflow control based on mixed integer programming[J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(2): 356-365.
- [83] 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.
- [84] 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 Kai, 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.
- [85] 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.
- [86] LI Junqiao, LI Yucheng, ZHANG Wei, et al. Multi-objective intelligent decision and linkage control algorithm for mine ventilation[J]. Energies, 2022, 15(21). DOI: [10.3390/en15217980](https://doi.org/10.3390/en15217980).
- [87] 邢永亮, 曹金龙. 煤矿智能化通风安全管控研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(增刊 2): 52-55.
- XING Yongliang, CAO Jinlong. Research on safety management and control of coal mine intelligent ventilation[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(S2): 52-55.
- [88] 范京道, 李川, 闫振国. 融合 5G 技术生态的智能煤矿总体架构及核心场景[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1949-1958.
- FAN Jingdao, LI Chuan, YAN Zhenguo. Overall architecture and core scenario of a smart coal mine incorporating 5G technology ecology[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1949-1958.
- [89] 王振平, 闫振国, 岳宁, 等. 矿井“一通三防”智能管控系统研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 193-197.
- WANG Zhenping, YAN Zhenguo, YUE Ning, et al. Research on intelligent control system of "one ventilation and three prevention" in coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 193-197.
- [90] 毛善君, 景超, 李团结, 等. 基于 4DGIS 的智能化矿区云平台关键技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2626-2640.
- MAO Shanjun, JING Chao, LI Tuanjie, et al. Research and application of key technologies of intelligent mining area cloud platform based on 4DGIS[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2626-2640.
- [91] 王国法, 富佳兴, 孟令宇. 煤矿智能化创新团队建设与关键技术研发进展[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 1-15.
- WANG Guofa, FU Jiaying, MENG Lingyu. Development of innovation team construction and key technology research in coal mine intelligence[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 1-15.