安全科学与工程

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): 314−329.
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): 314−329.

移动扫码阅读

矿井智能通风理论与技术研究进展

周福宝[1,2], 辛海会[2], 魏连江[2], 时国庆[2], 夏同强[2]
(1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 矿井智能通风是我国矿山智能化建设的安全保障。为实现矿井通风智能化，基于“平战结合”原则提出了井下通风人−机−环综合信息流智能感知与交互控制的理念。并从矿井智能通风理论及架构、矿井智能通风精准监测预警、矿井通风网络实时解算、矿井通风故障诊断与智能决策等 4 个方面论述了矿井智能通风系统平台架构，通风参数精准监测新型传感器研制与布置策略优化，通风参数信息流处理方法，风网解算方法，矿井气候与通风网络耦合解算，风网解算响应与控风决策，矿井通风故障源和故障原因诊断，智能通风灾变决策关键模型等基础理论与核心技术研究进展；同时提出了全断面风量直测新方法，消除井巷断面风速分布不均导致的点风速测风误差；发展了热湿耦合的风阻自适应调节风网实时解算模型，提高了风网实时解算精度与智能通风日常运行的稳定性；建立了基于全尺寸灾变试验数据的场−区−网耦合数值解算方法，构建了煤与瓦斯突出、火灾与瓦斯爆炸的灾变演化模型，突破了矿井智能通风系统的灾变自主决策与控制的方法瓶颈；结合矿井智能通风实施案例，详细阐述了矿井智能通风在精准测风、通风设施与装备联动控制、智能防火防尘等方面的现场实施与运行过程，指出了矿井智能通风建设存在的问题与发展趋势。

关键词: 矿井智能通风; 风网实时解算; 精准监测预警; 通风故障诊断; 灾变耦合解算模型
中图分类号: TD75 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253−2336(2023)01−0314−16

Research progress of mine intelligent ventilation theory and technology

ZHOU Fubao[1,2], XIN Haihui[2], WEI Lianjiang[2], SHI Guoqing[2], XIA Tongqiang[2]
(1. *China Academy of Safety Science and Technology*, *Beijing* 100012, *China*; 2. *School of Safety and Engineering*, *China University of Mining and Technology*, *Xuzhou* 221116, *China*)

Abstract: The safety assurance of intelligent mine building in China is intelligent mine ventilation. The idea of intelligent sensing and interactive control of underground ventilation human-machine-loop integrated information flow is pointed out based on the “combination of level and battle” in order to genuinely accomplish intelligent mine ventilation. Additionally, it covers the theory and design of mine intelligent ventilation, as well as accurate monitoring and early warning systems, real-time network problem-solving, fault diagnostics, and intelligent decision-making. Furthermore, it supports the platform structure of the mine intelligent ventilation system, the creation of new sensors for accurate ventilation parameter monitoring and arrangement strategy optimization, the processing of ventilation parameter information flow, the method for solving the wind network, the integration of the mine climate and ventilation network, the solution to the wind network’s response, and the concept of mine intelligent ventilation. To avoid the inaccuracy of point wind velocity measurement brought on by an uneven distribution of wind velocity in shaft section, a novel technique of direct measurement of wind volume in complete section is presented; To increase the precision of real-time wind network solution and the stability of routine operation of intelligent ventilation, a real-time wind resistance adaptive adjustment wind network solving model with heat and humidity coupling has been created. Building a catastrophe evolution model for coal and gas protrusion, fire, and other disasters requires the use of a field-area-network coupling numerical solution approach based on full-size disaster test data. Additionally, based on full-scale disaster test data, it developed a coupled field-area-network numerical solution method, constructed a disaster evolution model for coal and gas protrusion, fire, and gas ex-

收稿日期: 2022−12−20 **责任编辑:** 常 琛 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2022-2212
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808100); 教育部科技创新团队资助项目(IRT_17R103)
作者简介: 周福宝(1976—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士。E-mail: f.zhou@cumt.edu.cn

plosion, and overcame the obstacle to disaster autonomous decision making and control of mine intelligent ventilation system; In conjunction with implementation cases for mine intelligent ventilation, it elaborated the field implementation and operation process of mine intelligent ventilation in regards to precise wind measurement, linkage control of ventilation facilities and equipment, intelligent fire and dust prevention, and pointed out the issues and future direction of mine intelligent ventilation construction.

Key words: intelligent mine ventilation; real-time wind network solution; precise monitoring and warning; ventilation fault diagnostics; disaster coupling solving model

0　引　　言

矿井智能通风是矿山智能化建设的基石，是保障我国煤炭工业转型升级和高质量发展的核心技术之一。党的二十大报告为矿山指明了高端化、智能化、绿色化的高质量发展方向，八部委联合发布的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》为矿山通风智能发展提出了明确要求[1]。截至 2022 年底，在全国智能化矿井验收核查中，已初步建成智能通风系统矿井达 500 余座。通风是安全的保障，矿井智能通风建设要基于“平战结合”理念[2]，既满足日常通风的自动化管理与维护，又实现灾变时期的应急控风，有效抑制灾情演化[3]。因此，矿井智能通风应是对矿内空气参数、通风设施装备状态与控制参数、人员信息参数、灾害信息参数等综合信息流的智能感知与风险预警、智能决策与控制，是以通风安全多系统信息互通互联的物联网为核心，以减人、增安、提效和提高井下人员的幸福感与获得感为目标的智能安全与健康保障信息系统。矿井智能通风建设要实现通风信息智能化与灾害精准预警、矿井安全避险六大系统综合信息集成与智能运维的多系统融合互联、主动交互、协同联控和智能决策的发展目标，并基于矿山智能化建设的需求，形成风险评估、监测预警、安全保障、应急管控“4 个中心”的一体化智能通风管控平台，一个传输网络、一个库 (数据库)、统一数据接口标准[4]、统一服务器资源、统一展示界面和综合信息一张图的矿山智能通风建设路径。

近年来，国内外学者对矿井智能通风理论与关键技术进行了大量研究，在风网实时解算和智能决策核心算法上取得了突破，在智能通风综合信息平台方面实现了国内自主知识产权化，推动了我国矿井通风智能化的进一步发展，笔者通过对矿井智能通风理论及架构发展、矿井智能通风精准监测预警关键技术、矿井通风网络实时解算关键技术发展、矿井通风故障诊断与智能决策、矿井智能通风实施案例及发展趋势 5 个方面的分析与总结，指出了目前矿井智能通风的发展现状与趋势。

1　矿井智能通风理论及架构发展

矿井通风是保障矿井安全生产的最主要的技术手段之一，在矿井生产过程中，必须源源不断地将地面新鲜空气输送到井下各作业地点，以供给工作人员呼吸，并稀释和排除井下各种有毒、有害的气体和矿尘。实现矿井通风智能化是实现智能开采、建设智慧矿山的主要技术保障。通风智能化不仅涉及到空间科学、采矿技术和流体力学理论，更需要数学、自动化、计算机和信息科学的底层支持，研究矿井智能通风理论和技术是实现矿井安全智能化的基础保障。

1.1　矿井智能通风理论

矿井通风系统经历了由机械通风到局部智能通风再到全局智能通风的 3 个阶段。1973 年，“国际煤矿安全会议”在捷克卡路维——费里照例举行，会议系统地提出了有关矿井机械通风的若干问题及解决方法，但是传统的机械式通风局限于人工、半人工的方式，具有风机效率低、自动化水平低的缺点[5]；随着计算机及自动化的发展，中国矿业大学梁涛[6] 设计了一种采用脉动通风技术与变频调速技术相结合的掘进面智能通风控制系统，该系统能够对瓦斯体积分数传感器采集的瓦斯体积分数信号进行分析判定，实时控制掘进面局部通风机的转速，从而实现对掘进面通风的局部智能控制；近年来，基于“互联网+”和现代矿山物联网技术，卢新明[4] 提出了矿井通风智能化理论与技术；笔者团队[2] 系统研究了矿井智能通风原理、关键技术及其系统组成，明确阐述了矿井智能通风的定义与内涵。全局智能通风的发展为贯彻落实“十四五”发展计划，全面建成自动化和无人化的全局矿井智能通风系统奠定了理论基础。

1.2　矿井智能通风架构

随着人工智能技术近年来的飞速发展，为矿井通风问题的研究开辟了新的途径，数字化、智能化是矿井通风工程安全、高效发展的方向。矿井通风信息化研究可追溯至 20 世纪 50 年代，Scott 以及 Hinsley 两位学者将计算机技术应用于矿井通风问题的研究，20 世纪 70 年代宾夕法尼亚州立大学的 Stefanko

和 Ramani 两位专家[7] 针对矿井通风网络提出的一系列的数学公式，又为矿井通风信息化发展做出了很大贡献。之后，矿井通风的软件研究得到了极大发展，至 20 世纪末，国外较具代表性的模拟软件已达 8 种，国内通风软件的设计兴起于从 20 世纪 90 年代，诸多学者[8] 从不同角度出发设计了不同架构的矿井通风系统。

随着矿井开采难度的逐步加大，对矿井通风的要求也随之提高。近年来，相关从业者对矿井智能通风架构的研究更加深入，陈开岩等[9] 提出了用于矿井风温计算的新方法，开发了基于 n 维空间的埃特金加速迭代法的矿井风温预测软件，并建立了相应风温预测数据库，实现了矿井风温的计算机预测分析与信息管理应用。张国建[10] 将脉动通风技术与变频调速技术相结合设计了一种掘进工作面智能通风控制系统，主要架构包括风机控制系统、瓦斯检测系统、风量检测系统、执行系统等，该系统在保障通风安全的同时也实现了风量实时调节的目标，达到了节能降耗的目的。谢贤平等[11] 从多角度出发提出了智能系统架构设计方案，初步探讨了矿井通风设计与决策技术的多种综合集成方法，将数据管理及灾变模拟等功能相结合，构成了矿井智能通风系统框架。YIN 等[12] 在调研矿井通风智能系统系统所需的信息类型及信息获取方式的基础上提出了矿井智能通风系统的计算机辅助设计方法，并给出了该系统建设思路，认为智能通风系统的架构需综合集成多种设计方法才能达到足够的系统可靠性。张庆华等[13] 认为智能感知、智能决策、智能控制是通风智能化架构的重要组成部分，并指出系统自动成像、参数快速精准获取、通风调控联动分析决策与通风隐患识别与报警等技术是实现智能通风的技术难点。魏连江等[14] 开发了三维可视化矿井智能通风与灾变应急决策平台 (MIVDEDP)，并深入剖析其软件架构如图 1 所示，实现了矿井通风网络实时解算与异常智能诊断、灾情研判与风流应急调控。卢新明等[4] 经过多年的理论研究和软件开发，完成了矿井智能化通风的 4 层体系架构，具体为矿山 4DGIS 平台，矿山物联网平台，智能化通防软件与通风智能调控系统，为打造全程智能化的矿井通风系统提供借鉴。刘剑[3] 从实时网络解算、灾变时期智能控制、通风参数高精度快速测定、智能网络与智能装备等四方面提出了矿井通风智能化需要解决的关键科学技术问题，问题包括热流耦合通风理论、非线性观测器构建、传感器选址等。黄旭[15] 论述了矿井通风系统智能化的内涵、体系结构、智能化模型和建设逻辑，从概念层、关键科学问题与技术层等多层面对矿井智能通风架构进行研究，并提出了通风大脑的 3 层建设体系。

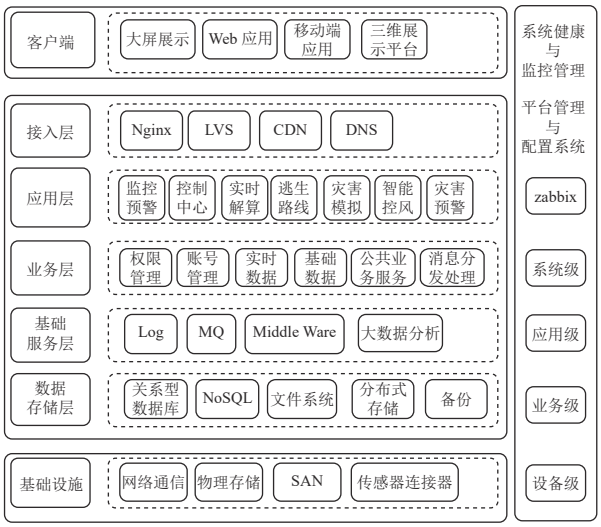


图 1　MIVDEDP 架构

Fig.1　MIVDEDP architecture

矿井智能通风成果之前多集中在智能化系统的组成、通风参数采集、风网解算与调控等局部方面，单点式的成果较多，整体性研究还处于起步阶段。同时在感知、决策与应急处置等方面智能化研究中存在技术难点，需加紧突破，以期实现通风基础参数智能感知、通风网络调控智能决策、通风灾变应急控制为一体的智能通风架构体系。

在现有矿井智能通风架构体系下，笔者所带领的矿井智能通风研究团队，在国家重点研发计划项目“矿井灾变通风智能决策与应急控制关键技术研究”的支持下，提出了矿井智能通风人–机–环一体的综合信息流建设架构，如图 2 所示。

2　矿井智能通风精准监测预警关键技术

矿井通风参数精准监测是实现实时网络解算、按需供风、异常预警、应急决策、灾变调控等系统功能的动态信息流，为矿井智能通风系统的安全可靠运行提供根本保障。近年来国内外学者积极攻克通风参数的精准监测难题，提出了通风参数感知和多参数优化配置的新方法，建立了通风状态预警分析模型，形成了系列技术装备和成套监测预警技术，为通风智能化建设奠定了感知基础。

2.1　矿井通风参数实时精准测定

矿井通风参数作为智能通风系统中的基础性数据，其实时感知与精准测定是通风网络解算、通风状

态分析、异常或灾变智能决策的关键，通过即时精确测量的通风参数可以实现对通风阻力测定、风机性能、风流变化规律等环节的日常监测与管理，通风参数包括风速、风量、温度、风压、瓦斯体积分数、一氧化碳浓度、其他有害气体浓度等。但是在井下实际测量时，经常因为风流的湍流性、巷道断面风速不均一、高温高湿浓尘环境以及传感器适用性问题等制约性因素，难以反映真实数据而导致监测数据可靠性较低，为有效解决以上难题，实现智能通风参数实时精准监测的目的，主要从新型传感器研制与布置策略优化和通风参数数据处理两方面进一步开展研究。

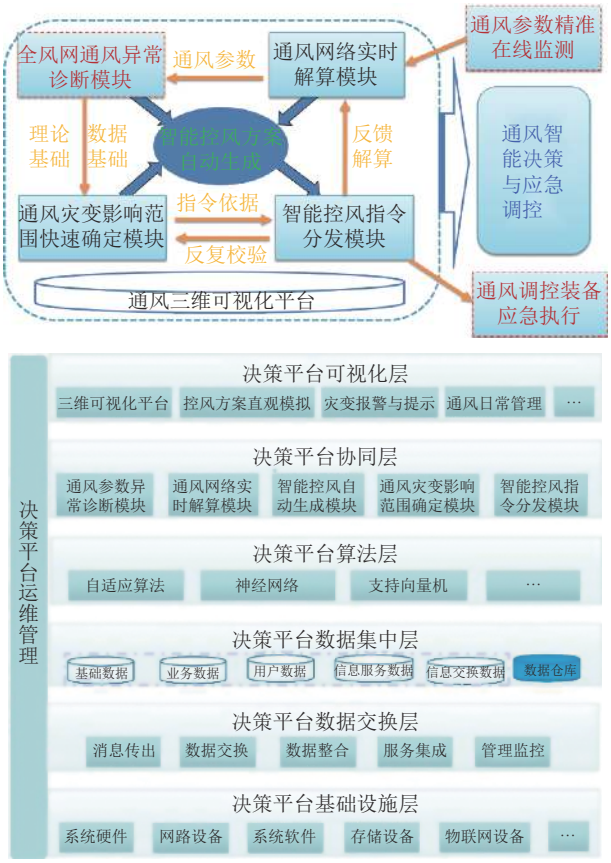


图 2　矿井智能通风平台架构

Fig.2　Mine intelligent ventilation platform architecture

2.1.1　新型传感器研制与测风方案的优化

基于井下布置的传感器获取相关通风参数是矿井智能通风系统安全运行的保证，但是当传感器测量精度不符合要求、布置方式不合理等导致的产生误差较大时，不仅不能获取真实数据，反而影响对全矿井通风阻力的测定以及日常通风管理工作。风速、风压作为保证矿井智能通风系统按需供风、智能调控的关键参数，其精准测量对实现矿井通风网络实时解算、通风异常监测预警、灾变风流应急调控等方面起到重要作用。

以测量风速为例，目前相关学者在超声波传感器测量风速的研究较多。笔者等[2] 采用超声波时差法，通过大跨度双向设置超声波接收与发射端，辅以时间数字转换芯片 (TDC) 精确计时技术和解耦算法，研发了线段风速高精度传感器，实现了全量程测量精度小于 0.1 m/s。蔡峰等[16] 通过研究超声波在煤尘–空气混合物中的传播和衰减特性，为研发新型煤矿井下超声波风速传感器提供了必要的试验基础。李秉芮等[17] 基于超声波时差法风速测量原理，设计了一种具有低启动风速的高精度矿用超声波风速测量仪，该风速测量仪的分辨率为 0.01 m/s，测量误差为±0.1 m/s，启动风速低于 0.1 m/s，可以满足矿井低风速巷道的精准测风要求。

然而，在矿井巷道测风时还需要考虑到传感器的布置策略和测风方式，例如仅将风速传感器简单布置在巷道一侧，就可能导致测量的风速与实际风速产生较大的误差，非常不利于通风网络解算和相关调控决策的制定。为此，邵良杉等[18] 通过模拟试验确定平均风速的位置，在平均风速相等的位置安装风速传感器最为准确，对于支护类型一样的巷道，即时在不同风速的情况下也几乎没影响。李作泉等[19] 提出的精准测风系统改变以点带面的测风方式，传感器通过 2 个超声波探头对风速进行测量计算，得出具体巷道中线风速来代表整个巷道的平均风速，极大地提高了巷道风速测量的准确性和实时性。倪景峰等[20] 提出 1 种嵌入式风速传感器优化布置方法与智能故障诊断系统，模拟试验表明可解决风速传感器布置与故障诊断模型不匹配的问题，提高模型故障诊断准确率，提高煤矿智能化水平。宋涛等[21] 提出了一种基于超声波全断面测风的矿井风网实时解算方法，利用超声波在两点间顺风、逆风传播的时间差实现巷道全断面测风，风速测定结果与声速无关，不受声速、温湿度和气压等参数影响，而且避免了传统风速传感器的风道易受矿尘堵塞的难题，测风装置的分辨率达 0.03 m/s。

2.1.2　通风参数数据处理方法的改进

在对通风参数的数据处理方面，通过改进相关算法，处理异常数据优化监测数据，分析风速风量风压之间的规律，用于通风系统网络解算、异常判断和通风系统优化等。黄旭[15] 基于信息熵理论对风速传感器进行了选址，并推导出纵向中线上平均风速等值点位置，风速传感器选址的条件依次为“风流扰动>巷道支护>与入 (回、用) 风口距离>巷道类型”；并结合使用 FCM-Rloss 或 FCM-SG 算法可对过程变

量和状态变量引起的风速异常数据进行有效处理。范远洋[22] 建立了通风数据分析与预测模型，利用矿井通风领域中广泛使用的通风效果评价与时间序列预测模型对这些数据进行 2 次处理，得到的结果为煤矿企业的管理人员提供了更有价值的决策信息。蒋成龙[23] 通过灵敏度算法和聚类算法对矿井通风系统进行风速和风压参数的监测优化，提出了反映分支风量变化与相关分支风阻之间关系的通风网络巷道风量风压变化规律，建立相应的数学模型。

2.2　矿井通风监测预警系统实践

在通风系统的监测环节，由于不可控因素导致的时刻变化的数据，如风流湍流扰动、瓦斯监测数据变化等，需要建设智能通风感知的实时监测预警系统，实现对风速 (风量)、瓦斯体积分数等通风参数的在线分析和动态预警，形成通风监测数据的科学分析体系，提高通风异常的智能研判能力。李敏等[24] 将矿井通风管理信息系统可纳入监测系统数据库，从而对整个矿井的通风系统进行仿真，实现通风监测数据与仿真一体化运行，提高煤矿安全预测预警水平。张婧[25] 提出了多源数据融合的矿井通风瓦斯灾害预警平台，通过多个传感器对瓦斯涌出量、温度和风速等数据进行采集，结果表明提高了矿井通风瓦斯灾害预警正确率，并且矿井通风瓦斯灾害预警结果更加可靠。王振平等[26] 将通风与瓦斯异常有机融合，根据现有的风速、风量、温湿度、甲烷、氧气、一氧化碳、压差等环境监测传感器数据，研究重点场所区域内气流场计算与预警算法，实现矿井通风瓦斯智能分析预警与管理。齐俊铭等[27] 在转龙湾煤矿进行应用实践，通过优化传感器布置，提出了通风网络关键参数精准感知技术，研发了矿井智能通防和应急管控平台，运用机器学习深度挖掘通防系统前兆异常状态特征，实现在线监测与超前预警。

虽然相关文献对新型传感器、测风方式、监测预警系统已进行了大量试验和效果验证，但是想要解决矿井智能通风的“卡脖子”问题，关键依旧在于通风参数的实时精准测定技术。突破高精度、高适用周期的测风传感器原理研究，开发全量程风速风压传感器、实现低风速巷道区域测量；利用风速、风压、温度、瓦斯、粉尘、其他有害气体浓度传感器以及优化改进通风数据处理算法，实现各巷道风速、风量、通风阻力等在线监测与实时通风网络解算，形成风网实时解算与传感器测定数据高度同步的新局面；解决复杂流场耦合作用下测风传感器优化布置与通风数据降噪处理、风量超前预测、通风异常预警等难题，仍然是未来矿井智能通风系统精准监测关键技术持续改进的发展方向。

2.3　井巷全断面风量直测方法

高精度风速传感器的发展为风速精准监测提供了技术支撑，风速测定的主要目的是计算井巷风量，由于全断面风量分布的不均匀性，在平均风速计算方面存在一定误差。井下巷道断面参差不齐，导致产生速压差的巷道较多，基于此，笔者团队提出了井巷全断面风量直测方法，通过差压监测的高风速区段风量直测方法，消除井巷断面风速分布不均导致的点风速测风误差。图 3 为井巷风量直测的计算原理。

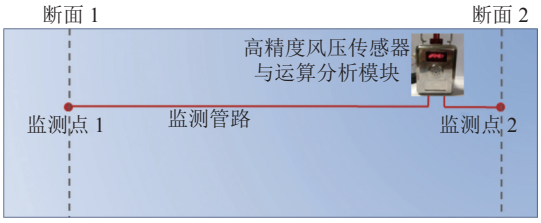


图 3　井巷风量直接监测技术原理

Fig.3　Principle of direct airflow monitoring technology in shaft

3　矿井通风网络实时解算关键技术发展

通风网络解算是智能通风与控制的底层核心技术。根据《煤矿智能化建设指南 (2021 年版)》和《智能化示范煤矿验收管理办法 (试行)》中关于智能通风与安全监控的建设标准，要求矿井具备通风网络动态解算功能，能对监测数据进行实时准确分析，同时具有通风系统故障诊断及灾害预测、预警能力。

近年来，国内外学者从风网的拓扑结构和状态方程入手，已对自然分风、按需供风计算和风阻调节等理论难题进行了深入探索，并将已发展的风网解算方法广泛应用于按需调风优化、均压、联合调节、在线闭环调控、测风优化布置、通风状态超前预测、通风系统故障诊断、通风设施调控等智能通风领域，为智能通风理论的突破提供了科学依据与可行方法。

3.1　通风网络解算方法的发展

矿井通风网络解算方法主要有物理模拟法、图解法、数学解析法。目前，计算机技术发展使得数学解析法和图解法更具优势，数学解析方法主要是构建通风系统函数关系式实现风网解算，图解法在展示计算结果方面有简单明了的优势。矿井通风网络解算程序逐渐成为矿井风网解算的主要手段。

目前可追溯到的网络解算方法是 1936 年的

Cross 算法，是一种水网逐次解算方法[28]。之后逐步发展了风网路迭代试算法[29]，“京大第 1 试算法”和“京大第 2 试算法”[30]。1967 年，立体通风网络解算程序的提出，标志着通风网络解算进入新阶段。在此基础上，Bandyopadhyay L K.等[31]建立了“ES-VENT”知识系统，用于辅助矿井安全工作人员做出决策；Dziurzynski W 等[32]首次引入了空气动力阻力与密度变化的关系，为矿井热湿风网耦合解算方法的发展奠定了基础；之后，Lowndes I S[33]和 Nyaaba W[34]均在矿井网络解算优化方面取得了进步，先后将遗传算法和新的 FOL 算法应用于矿井网络解算优化中，有效提高了通风系统网络解算效率与准确性。我国于 1973 年完成了第 1 个矿井通风网络解算程序，1984 年初步实现了多风机通风网络解算程序[35]。20 世纪 90 年代王德明等[36]、钟德云等[37]开发通风解算程序获得了广泛应用，解决了复杂网络调试反风余单向回路复杂快速收敛的问题。王树刚等[38-39]、魏连江等[40]、谢贤平等[41]学者进一步深化了矿井通风网络拓扑理论，提出了真假拓扑网络的概念，建立了通路树深度优先生长法与模糊优化数学模型。

3.2　矿井气候与通风网络耦合解算

当前，我国矿井深部开采趋于常态化，通风系统日益复杂，矿井气候条件如自然风压、温湿度变化等对于井巷通风状态的影响不容忽视。传统通风网络解算方法未全面考虑矿井气候特征，无法实时准确分析监测数据，不具备灾变风流如积聚瓦斯、火灾烟气等状态参数的预测与预警功能，不能满足智能通风建设的迫切需求。为此，需要研究矿井气候及灾变条件下通风网络状态参数的热流质耦合解算方法，从理论上提升通风网络定量分析的本质精度及可靠性。矿井气候与通风网络耦合算法是当前的重点研究方向之一。

美国研究人员 Carne. J. B.[42]最早研究了通风网络中封闭室内的自然风压变化，后续研究者 Koch. H 与 T. J. Kim 等[43-44]对于室内自然风压的性质进一步研究分析，系统阐述了自然风压的变化规律。我国矿井自然风压的研究起源于 20 世纪 70 年代，之后对矿井自然风压的产生原理与变化规律做了系统性的研究[45-46]。胡明松等[47]黄启铭等[48]等建立了自然风压对于通风网络影响的数学模型，定量分析了矿井自然风压、风量及分支风阻间的关系，为后面矿井通风网络分析与调节提供理论依据；高建良等[49-51]对巷道风流温度及湿度计算方法进行研究，考虑井下气候条件对通风系统的影响情况，为矿井气候与网络解算算法的结合打下基础；杜翠凤等[52]、李宗翔等[53]在矿井通风网络解算中引入了矿井空气热湿参数，引入了巷道风流换热模型，为矿井气候预测提供了计算基础；马恒等[54]、牛国庆等[55]进一步研究了矿井热环境对风网阻力计算的影响，完善了以热力学为基础的通风网络解算模型，为矿井通风网络的实时解算提供了基础[56]。在此基础上，笔者团队[57]根据风流与井巷围岩之间不稳定对流换热、井巷围岩氧化放热和热水沟散热等模型，结合节点风量平衡方程、回路风压平衡方程和多股风流混合的热湿平衡方程，提出基于空气状态参数与风量耦合迭代的通风网络风量调控决策的方法，这一算法为通风网络实时解算和风量调控决策提供了一种技术手段。此外，在通风网络解算收敛性研究方面，卢新明、张建中等[58–60]对线性和非线性逼近迭代方法进行了优化，提出了提高总体收敛性和超线性敛速的凸规划解方法。

3.3　风网解算响应与控风决策

当前，矿井通风难度与系统复杂性在各种因素的影响下激增，鉴于矿井通风系统在矿井生产过程中的重要作用，迫切需要深入研究矿井通风系统并解决相应的通风难题。通风网络状态随各种因素动态变化，而通风网络的异常变动或主动调控会对矿井用风地点造成直接影响，可能产生安全生产隐患，因此实时解算通风网络对于矿井风量调节和消除矿井灾变风险具有重大意义。魏引尚、宫良伟等[61–64]将在通风网络解算中嵌入采空区流场计算，提出了有限管耦合方法 (FTM)，得到了实时漏风下的通风网络特性。

自然分配风量通常达不到矿井用风地点的需风量，而且在矿井大气年周期性变化下，井下不同时期的风量分配都会有所不同。为满足用风地点的用风要求，降低用风地点受矿井气候环境变化的影响，需要对于矿井风量进行优化调节。矿井风量调节方法较多，对于局部通风网络调节可使用常用的增阻调节方法[65]，调节分支风量。为实现对分支风量的调控，引入风网灵敏度分析理论，矿井通风系统的灵敏度是矿井风量分配随各分支风道风阻参数变化后的反应灵敏程度，即风量参数的变化率。将通风网络中的节点风量平衡和回路风压平衡定律公式对分支风阻偏导[66]，即可建立分支灵敏度偏微分方程组，由此求得风网灵敏度矩阵。已证明风网灵敏度只与通风系统状态有关，即矿井通风系统在某一时期，其风网灵敏度是惟一且确定的[67]，对于矿井气候影响下

的通风网络解算模型同样符合。研究结果发现对于同一分支在增阻调节初期，阻力变化幅度对于用风地点的影响较大，随着阻力的增大，这种调控手段收效越来越不明显。因此，风网灵敏度模型及其分析是最优调节分支选择及定量控风决策有效性和准确性的有力保障。

4　矿井通风故障诊断与智能决策

4.1　矿井通风故障诊断

矿井通风系统故障的快速准确诊断是保证通风系统智能化的稳定运行，也是实现风流智能调控的关键。矿井通风故障诊断主要是利用矿井通风系统监测数据及矿井通风可视化仿真、神经网络技术综合分析通风动力、通风网络、通风设施等方面故障。其中，主要涉及的问题至少包括：故障源和故障原因诊断、传感器的优化布置、故障诊断方法问题。

4.1.1　矿井通风故障源和故障原因诊断

矿井通风故障源和故障原因诊断识别是矿井通风故障诊断的主要研究内容，采用不同的研究指标会对研究内容的结果产生一定的影响。目前，作为通风异常诊断研究的指标主要有风速、风阻、风量和风压等。赵丹[68]基于风速作为通风系统异常诊断研究指标对通风系统故障源进行诊断研究。刘剑等[69]提出基于风量作为研究对象的矿井通风故障诊断研究，根据风量传感器感知的风量变化确定通风系统发生阻变型故障的网络拓扑位置及其等效风阻。但由于采用单一特征指标进行异常诊断研究可能会导致诊断结果的准确性无法得到准确保证，随后，又提出基于风量–风压复合特征作为异常诊断研究指标，进一步提高了故障源诊断准确率和更低误差的故障量诊断性能[70]。倪景峰等[71]以矿井风量变化规律特征，快速判断出故障源和故障量。因此，综合大量的研究成果分析得出风速、风量、风压指标可以较好地进行矿井通风系统故障诊断。

4.1.2　传感器的优化布置

矿井通风系统故障诊断，需要大量实时数据，为提高诊断效果、降低成本和维护工作量，通风参数传感器的优化布置研究至关重要。井下传感器主要包含风速、风压等传感器，各传感器实时获取井下各地点通风参数，实时反馈于通风诊断系统。井下传感器数量太少，不能够有效诊断通风系统故障，而传感器数量偏多，投资成本又过高，且维护工作量大。因此，如何合理地设置传感器的数量和位置，以达到充分有效利用监测数据，实现科学的、实时的监测监控，这是矿井通风系统故障诊断研究需要解决的问题之一。目前，在传感器优化布置方面的研究比较多。倪景峰等[20]提出基于决策树的矿井通风故障源分类判断、故障量回归预测及嵌入式风速传感器优化布置一体化方法，解决风速传感器优化布置与诊断模型不匹配的问题。李雨成等[72]提出基于角联子网的风量反演风阻病态改良算法与基于贪心策略的风压传感器优化布置算法，给出了算法步骤及程序框图，能够解决风量反演风阻算法的病态问题，实现布点合理、数量较少的风压传感器的优化布置，刘剑等[73]根据巷道风量对故障位置及故障量的重要度，得到的约简分支即为应当安设传感器的最优位置。目前，从不同角度对传感器的优化布置进行了大量研究，取得较好效果。

传感器布置点的合理与否，会对故障诊断结果产生重要影响，合理的传感器优化布置，可以减少监测信息的冗余，同时，也会降低设备的维护和管理等方面问题。目前，风速、风量传感器的优化布置研究基本可以满足矿井通风系统故障诊断的需要。

4.1.3　故障诊断方法

采用合理的诊断识别方法能够在一定程度上使矿井通风故障诊断结果准确性和时效性得到提升。对于故障诊断的研究中，无论是煤矿领域内还是在非煤矿领域内均有大量研究成果。在煤矿通风领域中，周启超等[74]使用支持向量机 (SVM) 方法对矿井通风系统进行故障诊断，提出了一种改进遗传算法 (GA)，在故障诊断过程中对支持向量机的 c,g 参数进行优化，提高矿井通风故障诊断的效率、准确率，同时避免过拟合现象。赵丹等[75]通过建立矿井通风系统故障树设计面向故障树的基于框架与规则的混合知识表示方法，利用框架中诊断规则的推理确定故障传播关系，找到通风系统故障源。倪景峰等[71]为了在矿井通风网络发生阻变型故障时，能够快速准确判断出故障源和故障量，提出基于随机森林的通风网络故障源和故障量诊断方法。因此，目前在矿井通风系统故障诊断中主要采用支持向量机、BP 和 RBF 等神经网络智能算法。

4.2　智能通风决策关键技术

矿井智能通风决策是矿井智能通风建设的核心和关键，关键技术主要涉及到矿井通风网络实时解算、矿井通风系统故障诊断、风流智能调控等。矿井通风网络实时解算、矿井通风系统故障诊断等技术在前面已经进行了详细论述。通风网络风流智能调控是智能通风决策的关键技术之一，根据通风网络

分析井下各地点及各用风地点需风量分配情况进行精准调控井下风量，实现井下用风地点按需供风。在风流智能调控方面，通风领域专家做出了大量相关研究，卢新明等[4]为彻底解决矿井通风智能化，从风网的拓扑结构和状态方程入手，逐一对自然分风算法、按需分风计算和风阻调节优化等理论疑点进行了深入讨论，对按需调风优化、均压调节优化、风向调节优化、联合调节优化、在线闭环调控、监控点优化布局、通风系统状态估计、需风量超前预测、反风风道识别、可靠性调节优化、通风系统初始化、通风系统故障诊断、智能调控风门风窗、通风智能化软件系统等关键技术进行了深入研究。笔者等[2]系统研究了矿井智能通风原理、关键技术及其系统组成，阐述了矿井智能通风的定义与内涵：矿井智能通风是通过智能控制实现按需供风。魏连江等[14]提出矿井通风网络实时解算方法、通风系统异常诊断方法和灾情研判方法，开发三维可视化 MIVDEDP，实现矿井通风网络实时解算、异常诊断、灾情研判与风流应急调控。在实现智能通风决策关键技术上需要实现矿井通风网络快速构建、通风智能联动调控和通风异常或故障的智能诊断识别与及时报警。目前，在联动调控方面存在于大量研究成果，吴新忠等[76]为快速实现井下用风地点智能按需调控优化，又提出一种基于多策略融合麻雀搜索算法的矿井风流智能调控方法。随后，作者为及时满足井下某一用风地点的需风要求，提出一种根据分支风量期望值来选择不同调节分支的智能应急调风方案[77]。郝海清等[78]基于典型采区通风网络，利用 Ventsim 软件建立了运输巷火灾区域网络模型，分析了灾变风烟流扩散运移、诱导风流紊乱和调控规律，提出了 2 种控风排烟调节方案。张智韬等[79]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。因此，矿井智能通风决策关键技术主要涉及到矿井通风网络实时解算、矿井通风系统故障诊断、风流智能调控等关键技术，国内外专家学者进行了大量相关研究，但是，我国智能通风建设起步比较晚，矿井智能通风决策关键技术在矿井智能通风的应用效果还需要进一步验证。

4.3　矿井风网灾变耦合解算模型

目前在矿井风网实时解算方法方面已取得了突破，尤其是笔者团队提出的热湿耦合变风量风阻自适应解算模型，大幅提高了风网解算效率与准确度。但在矿井灾变时的风网灾变耦合解算模型上一直未有较大突破。笔者团队在重点研发计划支撑下，提出了全尺寸巷道灾变试验为基础的灾变源场–区-网耦合解算方法。基于 30 余次全尺寸巷道火灾试验，建立了火灾风烟流温度演化理论模型 (式 (1))，为灾变风网实时解算提供了依据；基于国内外全尺寸巷道瓦斯爆炸的 200 多组试验数据，建立了矿井瓦斯爆炸冲击波衰减理论模型 (式 (2))；基于 24 次煤与瓦斯突出的真实事故案例，确定了突出煤量与瓦斯量关系，建立了煤与瓦斯突出涌出量模型 (式 (3))。其中，巷/隧道火灾时期巷风烟流温度$T(x,t)$演化规律如式 (1) 所示：

$$T(x,t)=\frac{\left\{\dfrac{0.268}{\left[1+\left(\dfrac{516.44}{t}\right)^{2.56}\right]\left(1+\dfrac{t}{602.38}\right)^{2.8}}\dfrac{mq}{4.78\times10^{9}}\right\}\rho Qq}{C_{\mathrm{p}}\rho Q+kQ^{0.8}U^{1.2}S^{-1}x}+T_0 \tag{1}$$

式中，m为燃料消耗率，kg/s；q为燃料热值，J/kg；$k(t)$为比燃料消耗率；t为燃烧时间，s；ρ为空气密度，kg/m^3；Q为进风体积流量，m^3/s；m为单位长度巷道空间内燃烧物的质量，kg/m；C_{p}为空气的定压比热，J/(kg·K)；T为烟流温度，K；k为对流换热系数常量，通常岩巷中取 10~46，煤巷中取 58~94；U为巷道周长，m；S为巷道横截面面积，m^2；x为烟流蔓延到的位置与火源的距离，m。

瓦斯爆炸冲击波超压随距离变化的公式如下：

$$\Delta p=2.06\times10^{-2}\left(\frac{E_0}{R^3}\right)^{0.91}\left(\frac{R^2}{S}\right)^{1.39}\mathrm{e}^{-\beta\frac{R}{d_{\mathrm{B}}}} \tag{2}$$

式中，E_0为瓦斯总爆炸能量，kJ；d_{B}为水力直径，m；S为巷道横截面面积，m^2；β为壁面粗糙度系数，无量纲；R为选定点距爆源距离，m；Δp为距爆源R处的冲击波超压值，kPa。

突出瓦斯涌出规律如下：

$$q=\begin{cases}\dfrac{76.86Mv_1d}{t_0^2d_{\mathrm{e}}}\left[\dfrac{t-t^2/t_0}{K_{\mathrm{n}}-1}-\dfrac{(t+1)^{2-K_{\mathrm{n}}}-(1-2t/t_0)}{(K_{\mathrm{n}}-1)(2-K_{\mathrm{n}})}+\dfrac{2(t+1)^{3-K_{\mathrm{n}}}-2}{(K_{\mathrm{n}}-1)(2-K_{\mathrm{n}})(3-K_{\mathrm{n}})t_0}\right]+\dfrac{p_{\mathrm{m}}\varphi_{\mathrm{m}}}{p_0\rho}\dfrac{76.86M}{t_0^2}\left(t-\dfrac{t^2}{t_0}\right), & t\leqslant t_0\\ \dfrac{76.86Mv_1d}{t_0^2d_{\mathrm{e}}}\left[\dfrac{2(t+1)^{3-K_{\mathrm{n}}}-2(t-t_0+1)^{3-K_{\mathrm{n}}}}{(K_{\mathrm{n}}-1)(2-K_{\mathrm{n}})(3-K_{\mathrm{n}})t_0}-\dfrac{(t-t_0+1)^{2-K_{\mathrm{n}}}+(t+1)^{2-K_{\mathrm{n}}}}{(K_{\mathrm{n}}-1)(2-K_{\mathrm{n}})}\right], & t>t_0\end{cases} \tag{3}$$

式中，t_0 为突出孔洞形成的持续时间，s；v_1 为煤样暴露 1 s 时的瓦斯解吸速度，$cm^3/(g\cdot s)$；K_n 为煤粒瓦斯涌出的衰减系数；d 为粉碎煤粉的颗粒直径；p_m 为煤层瓦斯压力；φ_m 为煤孔隙率；ρ 为煤密度；p_0 为标准大气压；M 为突出强度，t。

在灾变模型的基础上，通过考虑不同灾变类型对巷道风压和风量的叠加效应影响，基于最短路径算法，建立了参数约束条件灾变风烟流控风模型 (式(4))，确定关键分支巷道自动风门的调节状态，在保证灾变时期风流不发生逆转的前提下，将灾变烟流快速排入回风井。假设通风网络有 n 条分支、m 个节点，任一点到回风巷的路径有 k 条，每一条路径上的路径参数分别为：风阻 R_{ij}，风压 h_{ij}，距离 S_{ij}，排烟量 L_{ij}，则控风模型的一般形式为

$$M=\max\left\{\omega_1\bar{R}_{ij}+\omega_2\bar{h}_{ij}+\omega_3\bar{L}_{ij}+\cdots+\omega_s\bar{S}_{ij}\right\} \quad (4)$$

式中，M 为某一控风方案的综合评分；为了消除不同指标量纲的影响；$\bar{R}_{ij}$，$\bar{h}_{ij}$，$\bar{S}_{ij}$和$\bar{L}_{ij}$分别为目标函数中路径参数的无量纲风阻、风压、距离和排烟量；ω_1，ω_2，ω_3 和 ω_s 分别为采用熵权法计算的指标权重值。

在实际控风过程中，通过对比各个控风方案下的路径参数，采用熵权法对评价指标客观赋权，确定了各控风方案下的最优排烟路径，进而确定最优控风方案，为遇险人员逃生、救护队员应急救援创造条件，使矿井网络从灾变危险状态快速地恢复为安全状态。但在实际控风时，还需要考虑风量分配后能否满足煤矿的需风要求，控风模型的流程如图 4 所示。

5　矿井智能通风实践及发展趋势

结合枣庄矿业集团付村煤矿一通三防工作实际，

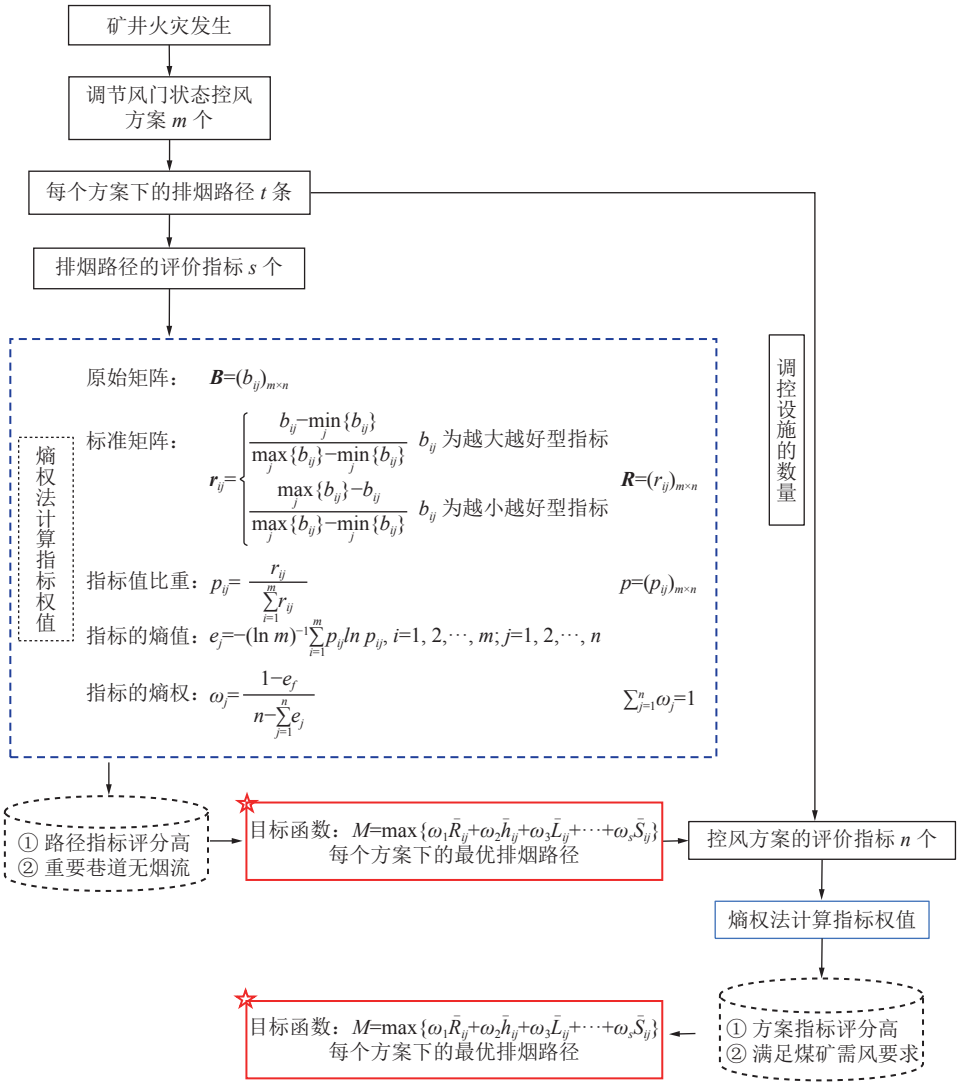


图 4　灾变控风流程

Fig.4　Flow of disaster ventilation control

立足“平战结合”，以“补齐基础硬件层、集成底部控制层、研究关键技术层、构建核心决策层”的工作思路，建立了智能通放系统架构 (图 5)，开展了矿井通风系统智能决策与动态管控技术的建设与应用示范，形成付村煤矿矿井通防信息综合管理与控制平台，平台集通风参数智能感知，通风动力、风门风窗等设施智能调控，通风安全系统集成管控等功能于一体。

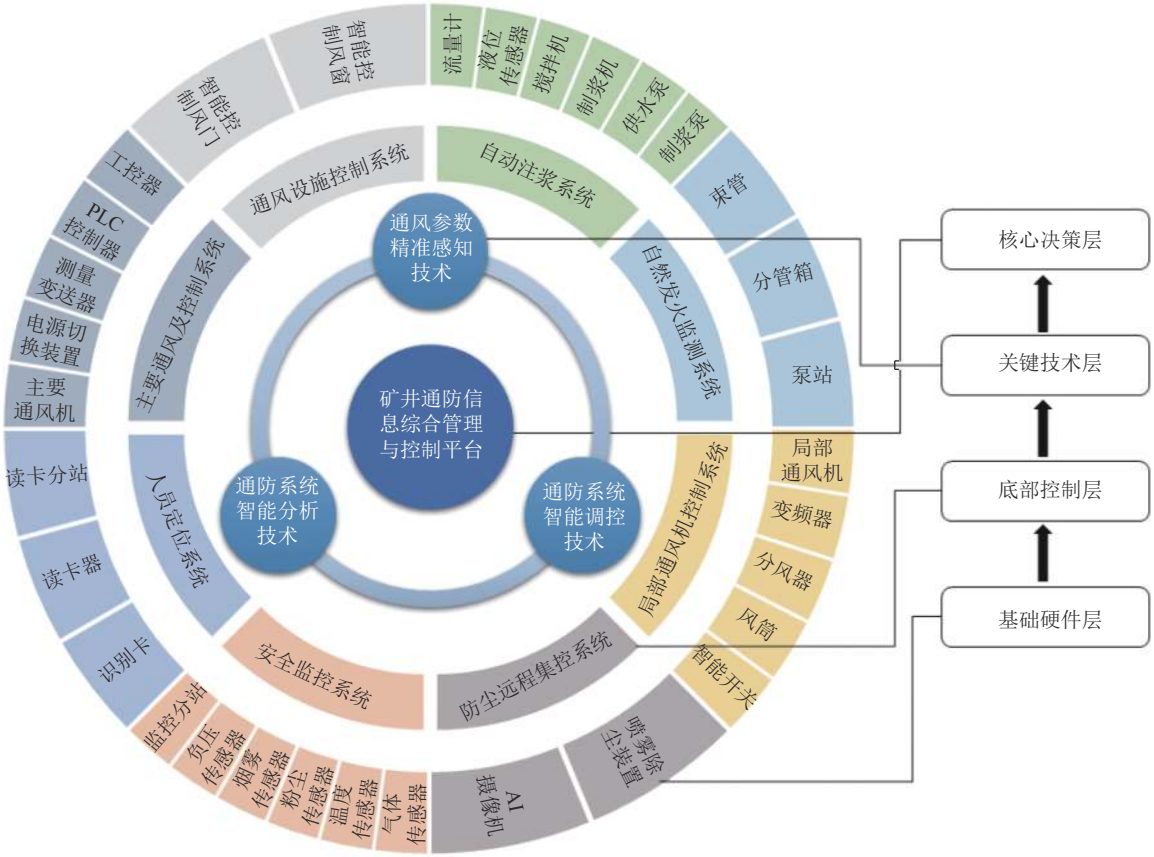


图 5　付村煤矿智能通防系统架构

Fig.5　Architecture of intelligent ventilation system in Fucun Mine

5.1　精准测风系统

在付村矿 3 上 1008 运输巷、3 上 1008 轨道巷、3 上 1008 运输巷联络巷风窗、北翼轨道石门进风巷、北翼进风巷、北翼总回风巷 6 个位置安装精准测风装置，多参数监测装置主机放置在北翼第 2 变电所内。精准测风装置通过风速检测软件，可实现 6 个位置断面的实施平均风速测量。同时通过加入测量断面的面积，增加了实时风量的显示，可方便通风管理员实时动态的监控各位置的风量情况。通过软件可查看每个风速检测点的实际安装位置、每个安装点位的最大值、最小值、平均值等数据，设置下限和上线报警，进行风速的智能判断报警。现场试验表明，该精准测风装置系统 (图 6) 运行稳定，风速数值与实际人工测量数据基本吻合，能够满足现场恶劣环境的使用要求。

5.2　智能风门风窗建设

在 3 下 1008 单轨吊通道、东六轨回第 1 联巷、东六采区集中运输巷、东六采区集中进风巷、北翼轨回风巷联络巷、3 上 1206 运输巷联络巷 6 套智能风门，3 下 1008 回风巷联络巷、3 上 605 回风巷联络巷、3 下 1006 回风巷联络巷、东十单轨吊加油硐室、3 上 605 条带巷回风巷联络巷、东十二辅助采区运输巷回风巷联络巷 6 套智能风窗的安装，形成了智能



图 6　精准测风装置

Fig.6　Precise wind measurement device

风门风窗控制系统 (图 7)。现场运行正常，实现了风门风窗的远程可视化控制，切实提高了通防专业智能化水平，减少员工劳动强度。



图 7　智能风门风窗控制系统

Fig.7　Intelligent blower door and window control system

智能风门风窗具备远程控制功能，可以远程控制或就地实现手动、自动模式切换，驱动与位置反馈精确无误，可实现风量的线性调节，精度控制和设定值小于 2% 范围以内；上位机数据可图形化 (仪表盘、柱状图) 实时显示开、关窗时长、风速、风量、风窗角度等参数，可实时反馈风窗状态，现场视频监控功能完好，影像清晰；风窗开关状态、关键动作等数据实时存储并可自检、查询打印报表；矿井通风智能控制系统命令执行与反馈功能，控制系统应免费提供与矿井智能通风系统对接的接口协议实现系统融合，确保智能通风系统对其控制灵敏可靠；系统具有统一的数据接口，可与其他系统联网；系统留有外部控制接口，供 PLC 控制系统接入。

5.3　智能局部风机

在局部风机变电所附近安装隔爆交换机，并铺设光缆和电源线等，实现局部通风机智能开关数据远程上传至 智能通风系统中心。实现远程控制及显示功能；实现与智能通风系统数据交互，实现与智能通风系统连接并显示局部通风机画面及数据；完成了 3 下 1006 运输巷、3 下 1009 轨道巷、东十二辅助采区运输巷 6 台变频局部通风机的安装，并实现数据上传和远控。

5.4　主通风机

针对主通风机安装了在线监控系统，可实现风机的远程集中控制，并实现自动化控制，且实时在线监测风机的各项参数，实现智能化故障诊断，含数据采集、状态监测、实时报警、数据分析、综合评价、专家诊断、大数据预警、报表统计，及时提供设备当前的健康状况及运行趋势等；建立了主通风机运行的智能数据库，数据库兼有远程专家诊断系统，通过系统自诊断，实现对叶片扭曲、电机振动、电机温度、电压电流异常等全面预诊断，建成了通风机智能控制系统 (图 8)；对风井的防爆门进行了智能化升级改造，安装了防爆盖锁控状态、防爆盖压板投切位置、动力源状态及参数、风洞负压等与风井相关设备的关键数据和参数实现远程监测监控装置，实现了防爆盖自动复位，具备一键式启动、反风、倒机功能，故障自动倒机、停机自动倒机等动作时的防爆盖随动投切功能。



图 8　通风机智能控制系统

Fig.8　Intelligent control system for ventilation fans

5.5　智能防尘系统

付村煤矿共有 2 处综采工作面、2 条掘进巷和 2 处辅动大巷安装了喷雾降尘系统。其中综采工作面两巷设计破碎机智能喷雾降尘及破碎机后方净化水幕，综采工作面回风巷 100 m 设计 1 套净化水幕喷雾降尘装置；每条综采工作面运输巷有 2 处输送带转载点各设计 1 套 AI 摄像机智能控制喷雾降尘装置；每处掘进巷桥转处、跟进输送带处和附近的净化水幕设计安装共用 1 套喷雾降尘装置；每处掘进机后方 100 m 处设计安装 1 套智能喷雾降尘装置；每处掘进巷有 2 处输送带转载点各设计 1 套 AI 摄像机智能控制喷雾降尘装置。

安装的智能降尘系统 (图 9) 实现了井下的煤流识别喷雾、定时喷雾、粉尘超限喷雾、输送带起动喷雾、人过车过停喷等功能，对大巷喷雾通过摄像头进行监控，并且能够在集控室对井下现场进行统一控制管理。井上 1 个监控点及井下 19 个岗点投入使



图 9　智能降尘系统

Fig.9　Intelligent dust reduction system

用，信息采集完毕且已下发权限设备可以通过煤流识别验证进行工作，也可定时、粉尘设限、输送带运行、井上集控等设定进行控制。

5.6　智能注浆防灭火系统

以安全、实用、精确、高度自动化为原则实现黄泥灌浆防灭火系统的智能化改造。主要在原有系统上更换了清水、泥浆电磁流量计、液位传感器、电控柜及线路等，增加了综合控制操控台及配套的电控柜，实现了远程控制功能，并增加了视频监控系统。

智能化升级改造后注浆控制系统具有手动、自动 2 种启动方式。注浆监控系统组态画面显示注浆流程图、主要参数及设备运行状态，如设备运行电流等参数，系统具备完善的通信功能，远程控制功能，实现注浆全过程自动化；计算机综合控制系统和配套动力系统新增自动化控制操作台 (图 10)，更换工业控制计算机及专用系统控制软件，增加远程视频监控及物联功能，实现实时精确监测制浆，注浆过程数据，并可自动生成班报表、日报表供查看、统计、调阅；实现自动化监控，无人值守，整个制浆站仅需 1~2 人，即可实现 24 h 连续制浆作业；相关人员可在有权限情况下，远程控制施工现场的计算机和各种设备，现场视频监控系统通过网络同步远传连接至远程办公室大屏，可用手机或电脑客户端拉伸、缩放查看关键设备、关键部位。



图 10　注浆防灭火控制平台

Fig.10　Control platform for slurry injection and fire prevention

5.7　现场实施存在的问题及发展趋势

目前，智能通风的建设初步解决了矿井通风管理工作面临的时效性差、强度大等问题，但仍需要持续改进，突出表现在以下 3 个方面：

1）智能通风系统还处于自动化有余、智能化不足的阶段。针对这一问题，要重视规划融合大数据分析、数据挖掘等技术，发挥智能化方法在通风系统故障分析、灾害智能预警等方面的应用。

2）高精度新型传感器可靠性还不确定，运维保障制度还不健全，存在因传感器失效而增加风险的可能性。针对该问题，要深入测试分析煤矿井下高湿、高粉尘等恶劣工况条件下传感器精度衰减变化规律，形成智能化装备的运维保障制度。

3）鉴于 1)、2) 现状，智能通风系统建设，目前还未能形成减员提效的局面。为此，要通过常态化运行深入考察智能通风装备可靠性，论证智能化分析预警模型的适用性，并率先在条件好的矿区开展瓦检、测风队伍减员提效的先行先试，在得到验证的基础上逐步推广。

6　结　　语

目前，矿井智能通风仍处于发展阶段，通风参数测定精度、通风设施与装备的智能联动可靠性、风网实时解算方法等方面均在不断进步，更为关键的是井下风网信息流的认知与一体化监测方法、灾变演化的超前信息感知与风险预警等核心理论与技术的进步，将大幅提升矿井通风智能化水平，真正实现矿井智能通风增安、减人、提效和提高从业人员在安全与健康保障方面的幸福感与获得感。

参考文献(References):

[1] 国家能源局.《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的政策解读[EB/OL](2020-03-06). http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138849458.htm

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 马洪义，李永植，安志雄. 矿井通风[J]. 煤矿安全，1974(5)：46−50.
MA Hongyi, LI Yongzhi, AN Zhixiong. Mine ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 1974(5): 46−50.

[6] 梁　涛，侯友夫，吴楠楠. 掘进工作面局部通风智能监控系统的研究[J]. 矿山机械，2008，36(1)：19−22.
LIANG Tao, HOU Youfu, WU Nannan. Study on the intelligent monitoring system of local ventilation for developing face[J]. Mining & Processing Equipment, 2008, 36(1): 19−22.

[7] 黄元平. 矿井通风[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1986.

[8] 谢贤平, 韩孟微. 矿井通风信息化和智能化研究[J]. 云南冶金, 2012, 41(5): 1−7.
XIE Xianping, HAN Mengwei. Research on informationization and intellectualization of mine ventilation[J]. Yunnan Metallurgy, 2012, 41(5): 1−7.

[9] 陈开岩, 贺俊杰. 矿井风温预测的一种加速迭代计算新方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 233−235.
CHEN Kaiyan, HE Junjie. An novel method of faster iterative computations for forecasting temperature of airflow in coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 233−235.

[10] 张国建. 掘进工作面智能通风控制系统的设计与应用[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(5): 76−79.
ZHANG Guojian. Design and application of intelligent ventilation control system to mine roadway heading face[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(5): 76−79.

[11] 谢贤平, 冯长根, 赵梓成. 矿井通风设计的智能化研究[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(1): 11−15.
XIE Xianping, FENG Changgen, ZHAO Zicheng. Research on Intellectualization of the design of mine ventilation system[J]. Mining Research and Development, 2000, 20(1): 11−15.

[12] YIN X, XIE X, LI Z, *et al*. Design of mine ventilation systems based on artificial intelligence[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(614): 107−112.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 黄　旭. 矿井智能通风系统架构及实时网络解算研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
HUANG Xu. Research on the architecture of mine intelligent ventilation system and real-time network solution [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.

[16] 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.

[17] 李秉芮, 刘　娜, 井上雅弘. 高精度矿用超声波风速测量仪设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 119−124.
LI Bingrui, LIU Na, INOUE M. Design of high precision mine ultrasonic anemometer[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(2): 119−124.

[18] 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 Liangbin, YU Baocai, CHEN Xiaoyong. Key technology of mine intelligent ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 121−124.

[19] 李作泉, 张应芳, 马瑞峰, 等. 矿井通风智能化管控系统设计[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 226−232.
LI Zuoquan, ZHANG Yingfang, MA Ruifeng, *et al*. Design of mine ventilation intelligent control system[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 226−232.

[20] 倪景峰, 乐晓瑞, 常立峰, 等. 基于决策树的矿井通风阻变型故障诊断及传感器优化布置[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(2): 34−39.
NI Jingfeng, LE Xiaorui, CHANG Lifeng, *et al*. Resistance variant fault diagnosis and optimized layout of sensors for mine ventilation based on decision tree[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(2): 34−39.

[21] 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.

[22] 范远洋. 基于开源WebGIS的矿井通风监控与分析系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
FAN Yuanyang. Research on mine ventilation monitoring and analysis system based on open source webgis [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[23] 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 and Technology, 2022.

[24] 李　敏, 赵硕嫱. 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 Shuoqiang. Research on mine ventilation simulation technology based on monitoring data[J]. Coal Technology, 2021, 40(5): 145−148.

[25] 张　婧. 多源数据融合的矿井通风瓦斯灾害预警平台[J]. 煤炭技术, 2022, 41(10): 237−239.
ZHANG Jing. Mine ventilation gas disaster early warning platform based on multi source data fusion[J]. Coal Technology, 2022, 41(10): 237−239.

[26] 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.

[27] 齐俊铭, 王　凯, 王志静, 等. 转龙湾煤矿矿井智能化通防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.

[28] CROSS H J U O I B. Analysis of flow in networks of conduits or

conductors [J], 1936, 286(1): 42–47.

[29] SCOTT D R, HINSLEY F B J C E. Ventilation Network Theory [J], 1951.

[30] 张国枢. 通风安全学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.

[31] BANDYOPADHYAY L K, SINHA S K. Development of an expert system for on-line ventilation network analysis and graphic representation of mine ventilation parameters[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2002, 102(3): 125−130.

[32] DZIURZYNSKI W, KRACH A, PALKA T. Airflow sensitivity assessment based on underground mine ventilation systems modeling [J]. Energies, 2017, 10(10): 1451.

[33] LOWNDES I S, FOGARTY T, YANG Z Y. The application of genetic algorithms to optimise the performance of a mine ventilation network: the influence of coding method and population size[J]. Soft Computing, 2005, 9(7): 493−506.

[34] NYAABA W, FRIMPONG S, EL–NAGDY K A. Optimisation of mine ventilation networks using the Lagrangian algorithm for equality constraints[J]. International Journal of Mining Reclamation and Environment, 2015, 29(3): 201−212.

[35] 程　磊, 党海波, 彭信山. 矿井通风网络分析研究现状及趋势[J]. 煤炭工程, 2011(3): 90−92.
CHENG Lei, DANG Haibo, PENG Xinshan. Study status and tendency of ventilation network analysis[J]. Coal Engineering, 2011(3): 90−92.

[36] 王德明, 周福宝. 基于WINDOWS的矿井通风网络解算软件的研制[J]. 中国矿业大学学报, 2000(1): 41−44.
WANG Deming, ZHOU Fubao. Development of a WINDOWS-based mine ventilation network solution software[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000(1): 41−44.

[37] 钟德云, 王李管, 毕　林, 等. 基于回路风量法的复杂矿井通风网络解算算法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 365−370.
ZHONG Deyun, WANG Liguan, BI Lin, *et al*. Algorithm of complex ventilation network solution based on circuit air-quantity method[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 365−370.

[38] WANG S, SUN J, WANG J, *et al*. Research on fuzzy solution of Cross method for analysis of mine ventilation networks; proceedings of the 3rd International Symposium on Modern Mining and SAFETY Technology, Liaoning TECH Univ, Fuxin, PEOPLES R CHINA, F [C], 2008.

[39] 王树刚, 王继仁, 洪　林. 矿井正常和灾变时期通风网络解算的数学模型[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003(4): 436−438.
WANG Shugang, WANG Jiren, HONG Lin. Mathematical model for solving ventilation networks during conventional ventilation and emergency conditions[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003(4): 436−438.

[40] 魏连江, 周福宝, 朱华新. 通风网络拓扑理论及通路算法研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 926−930.
WEI Lianjiang, ZHOU Fubao, ZHU Huaxin. Topology theory of ventilation network and path algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 926−930.

[41] 谢贤平, 冯长根, 赵梓成. 矿井通风网络模糊优化数学模型及其数值解法[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(6): 27−32.
XIE Xianping, FENG Changgen, ZHAO Zicheng. Fuzzy optimization mathematical model of mine ventilation network and its numerical solution[J]. Journal of Safety Science and Technology, 1999, 9(6): 27−32.

[42] CARNE J B J E, INFECTION. The natural ventilation of unheated 'closed rooms' [J]. 1946, 44(5): 314–325.

[43] KOCH H J Z F A U A. Calculation and evaluation of natural ventilation of workrooms[J]. 1967, 17(9): 270–182.

[44] KIM T J, PARK J S J B, ENVIRONMENT. Natural ventilation with traditional Korean opening in contemporary house [J], 2010, 45(1): 51–57.

[45] ZHOU A, WANG K J J O M S. Role of Gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation [J]. 2018, 54(1): 111–119.

[46] WENGUI L, XIANPING X, HOUZAO X, *et al*. Reliability Calculation of Mine Ventilation Network [J]. 2014, 84: 752–757.

[47] 胡明松, 徐文忠. 自然风压对矿井通风网络稳定性影响的研究[J]. 煤炭工程, 2008(11): 72−74.
HU M S, XU W Z. Study on influence of mine natural ventilation pressure to stability of mine network[J]. Coal Engineering, 2008(11): 72−74.

[48] 黄启铭, 杜文州, 颜国强, 等. 深井自然风压变化规律及重点影响区域研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(9): 16−19.

[49] 高建良, 徐　文, 张学博. 围岩散热风流温度、湿度计算时水分蒸发的处理[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 951−955.
GAO JL, XU W, ZHANG XB. Treatment of water evaporation during calculation of temperature and humidity of airflow caused by heat release from the surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 951−955.

[50] 高建良, 张学博. 围岩散热计算及壁面水分蒸发的处理[J]. 中国安全科学学报, 2006(9): 23−28.
GAO JL, ZHANG XB. Treatment of water evaporation on airway surface in Calculation of strata rock heat[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006(9): 23−28.

[51] 高建良, 张学博. 潮湿巷道风流温度与湿度变化规律分析[J]. 中国安全科学学报, 2007(4): 136−139.
GAO JL, ZHANG XB. Analysis on the changing rule of airflow's temperature and humidity in wet airflow[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007(4): 136−139.

[52] 杜翠凤, 边梦龙. 矿井湿空气热湿参数的计算方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(6): 96−100.
DU Cuifeng, BIAN Menglong. Research on the calculation method of hot-moist parameters of mines moist air[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(6): 96−100.

[53] 李宗翔, 王天明, 张明乾, 等. 矿井巷道淋湿蒸发换热系数构建及风流温度计算[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3176−3181.
LI Zongxiang, WANG Tianming, ZHANG Mingqian, *et al*. Construction of air flow heat transfer coefficient and calculation of airflow temperature in mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3176−3181.

[54] 马　恒, 尹　彬, 刘　剑. 矿井风流温度预测分析研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 91−95.

MA Heng, YIN Bin, LIU Jian. Research on the prediction of airflow temperature in mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 20(11): 91−95.

[55] 牛国庆. 矿井通风阻力的热力学计算[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2001(2): 84−86.
NIU Guoqing. Thermodynamic calculation of mine ventilation resistance[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology(Natural Science), 2001(2): 84−86.

[56] 杨德源, 杨天鸿. 矿井热环境及其控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

[57] 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*. Venilation network solution based on coupling iteration air state parameters and air quantity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 613−623.

[58] 王长钰. 非线性管道网络中的线性逼近法的收敛性及推广[J]. 应用数学学报, 1978(4): 269−282.
WANG Changyu. Convergence and generalization of the linear approximation method in nonlinear pipeline networks[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1978(4): 269−282.

[59] 张建中. 一类求解管道网络方程的迭代法及其推广[J]. 应用数学学报, 1981(2): 175−189.
ZHANG Jianzhong. An iterative method for nonlinear pipe network equations and its generalization[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1981(2): 175−189.

[60] 卢新明. 非线性管道网络中的数学规划问题及解法[J]. 应用数学学报, 1989(3): 281−291.
Lu X M. Mathematical programming problems in nonlinear pipeline networks and their solutions[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1989(3): 281−291.

[61] 魏引尚, 邵炜航, 王　慧. 基于网络解算的采空区漏风分布计算模式[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 46−49.

[62] WU F L, LUO Y. An Innovative Finite tube method for coupling of mine ventilation network and gob flow field: methodology and application in risk analysis[J]. Mining Metallurgy & Exploration, 2020, 37(5): 1517−1530.

[63] 宫良伟. 基于AutoCAD Map 3D的通风仿真系统的研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
GONG Liangwei. Study on ventilation simulation system based on AutoCAD Map 3D [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2012.

[64] 姜诗明, 裴绍宇, 郤雷敏. 基于MATLAB的矿井通风网络解算程序编制[J]. 陕西煤炭, 2010, 29(6): 28−29,4.
JIANG Shiming, PEI Shaoyu, QIE Remin. MATLAB-based programming of mine ventilation network solution[J]. Shaanxi Coal, 2010, 29(6): 28−29,4.

[65] 米晓坤. 矿井局部风量与总风量调节[J]. 煤炭技术, 2009, 28(5): 107−108.
MI Xiaokun. Mine local air volume and total air volume adjustment[J]. Coal Technology, 2009, 28(5): 107−108.

[66] 姜诗明. 矿井通风网络灵敏度理论及应用[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 96−99.
JIANG S M. Theory and application of mine ventilation network sensitivity[J]. Safety in Coal Mine, 2011, 42(1): 96−99.

[67] 周　静, 刘　剑, 贾进章. 矿井通风系统灵敏度分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005(S1): 1−3.
ZHOU Jing, LIU Jian, JIA Jinzhang. Analysis sensitivity of mine ventilation system[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005(S1): 1−3.

[68] 赵　丹. 基于网络分析的矿井通风系统故障源诊断技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.
ZHAO Dan. Study of fault source diagnosis technology for mine ventilation system based on network analysis [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011.

[69] 刘　剑, 郭　欣, 邓立军, 等. 基于风量特征的矿井通风系统阻变型单故障源诊断[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 143−149.
LIU J, GUO X, Deng LJ, *et al*. Resistance variant single fault source diagnosis of mine ventilation system based on air volume characteristics with resistance variation[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 143−149.

[70] 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 J, YIN C S, HUANG D, *et al*. Unsupervised machine learning model for resistance variant fault diagnosis of mine ventilation damping faults[J]. Journal of China Coal Society, 45(9): 3157−3165.

[71] 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 JF, LI Z, LE XR, *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.

[72] 李雨成, 李俊桥, 邓存宝, 等. 基于角联子网的风量反演风阻病态改良算法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1147−1153.
LI Yucheng, LI Junqiao, DENG Cunbao, *et al*. Improved algorithm of air quantity calculating resistance based on diagonal subnetwork[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1147−1153.

[73] 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.

[74] 周启超, 刘　剑, 刘　丽, 等. 基于SVM的通风系统故障诊断惩罚系数与核函数系数优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(4): 45−51.
ZHOU Qichao, LIU Jian, LIU Li, *et al*. Research on optimization of penalty coefficients and kernel function coefficients for ventilation system fault diagnosis based on SVM[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(4): 45−51.

[75] 赵　丹, 陈　帅, 潘竞涛. 基于FTA的矿井监控预警诊断知识表示及推理机制[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 38−43.

ZHAO Dan, CHEN Shuai, PAN Jingtao. Knowledge representation and reasoning mechanism of mine monitoring warning diagnosisc based on FTA[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(6): 38−43.

[76] 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 XZ, HAN ZH, WEI LJ, *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.

[77] 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 XZ, ZHANG ZC, WANG K, *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.

[78] 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.

[79] 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/OL]. 煤炭学报, 2022: 1–11. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0503.
ZHANG Zitao, LI Yucheng, LI Junqiao, et al. Architecture and implementation of intelligent ventilation precise control system[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2022: 1 –11. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0503.