

矿井通风系统优化技术综述

孙 健, 穆晓锋

潞安化工集团阳泉五矿通风瓦斯管理中心, 山西 阳泉

收稿日期: 2025年8月13日; 录用日期: 2025年9月11日; 发布日期: 2025年11月7日

摘 要

本文综述了矿井通风技术的国内外研究现状, 探讨了矿井通风系统优化技术的重要性及基本要求, 并详细介绍了矿井通风系统优化技术, 包括井巷断面优化、风流调节技术优化、系统网络优化以及设备优化。通过这些优化措施, 可以提高矿井作业的安全性和效率, 降低有害气体浓度, 确保空气流通顺畅, 为矿工提供安全健康的工作环境, 并有效减少通风系统的能耗, 提高能源利用效率。

关键词

研究现状, 矿井通风, 系统优化技术, 安全性提升

Summary of Mine Ventilation System Optimization Technology

Jian Sun, Xiaofeng Mu

Ventilation Gas Management Center of Yangquan No. 5 Coal Mine of Lu'an Chemical Group, Yangquan Shanxi

Received: August 13, 2025; accepted: September 11, 2025; published: November 7, 2025

Abstract

This paper summarizes the research status of mine ventilation technology at home and abroad, discusses the importance and basic requirements of mine ventilation system optimization technology, and introduces the optimization technology of mine ventilation system in detail, including roadway section optimization, air flow regulation technology optimization, system network optimization and equipment optimization. Through these optimization measures, the safety and efficiency of mine operations can be improved, the concentration of harmful gases can be reduced, the smooth flow of air can be ensured, a safe and healthy working environment can be provided for miners, and the energy consumption of the ventilation system can be effectively reduced. Improve energy efficiency.

文章引用: 孙健, 穆晓锋. 矿井通风系统优化技术综述[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1197-1206.

DOI: 10.12677/me.2025.136134

Keywords

Research Status, Mine Ventilation, System Optimization Technology, Security Improvement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

矿井通风系统是确保矿工安全健康和矿井安全生产的关键。随着科技的发展, 矿井通风技术不断进步, 从早期的简单照明装置到现代的智能化通风系统, 矿井通风技术经历了显著的发展。本文旨在概述矿井通风技术的发展历程, 分析其在国内外的现状, 并探讨矿井通风系统优化技术的重要性和实施方法, 以为矿业行业的绿色发展和安全生产提供参考。

2. 矿井通风技术国内外研究现状

矿井通风网络解算与仿真作为掌握风流规律、支撑通风系统设计优化与风险预判的关键技术, 当前已在算法效率、场景适配等方面取得诸多进展。孔猛等[1]通过对实际煤矿分析现有通风系统存在的问题和原因。同时根据实际煤矿的采掘接续计划和通风系统存在的实际问题, 依据矿井通风阻力测定结果及矿井通风系统图确定出各风路的基础参数, 最终确定了现阶段通风系统优选方案。马跃晋[2]针对井下瓦斯通风网络风流密度误差大的问题, 建立矿井风流密度计算模型, 对瓦斯通风网络风流密度预测方法进行研究。对通风网络参数进行测定, 并建立 BP 神经网络预测算法模型。经实际工程验证, 结果表明误差范围能够满足井下对风流密度预测精度的需求。杨潇斌等[3]通过数学建模、流场分析及阻力控制技术, 合理调整风机运行参数和风道布局, 使风流分配更均衡, 降低无效风量损耗。王宇[4]根据可靠度 $R > 0.8$, 对实际煤矿的矿山开采情况、通风方式及参数绘制出通风网络图, 以矿井风量实时监测数据为基础, 通过应用拟合估计法, 得到了风路可靠度数值。并分析井下巷道内通风辅助设备对通风网络可靠性的影响。结果显示, 该煤矿通风设备满足安全要求。Qiang Sun 等[5]为了解决气流湍动和空气需求区域供气不足等问题, 本文将 MOBWO 算法引入通风系统风量优化领域, 并提出了一种基于 MOBWO 的矿井风量优化与调节方法。本文构建了一个以通风机总功率和空气压力调节复杂性为优化目标的多目标风量优化模型。结果表明, MOBWO 算法在收敛性和分布性能方面对其他算法具有显著优势。Marco Cotrina 等[6]本研究旨在利用人工神经网络优化地下矿井的通风系统, 以降低温度和相对湿度, 同时改善气流。使用了 66 个样本数据来训练 ANN 模型, 该模型包括 4 个输入参数, 128 和 64 个隐藏神经元, 以及 3 个输出参数。结果证实了人工神经网络可以有效地优化矿井通风系统。Lixue Wen 等[7]为研究针对矿井通风系统中高能耗、调控困难和调控方案不合理等问题。利用混合整数非线性规划建立了矿井通风网络调控的优化模型, 并基于 MINLP 的通风网络调节优化方法到一个煤矿通风网络。结果表明, 频率调节后的主风机功率为 71.84 千瓦, 与优化前的功率水平相比, 实现了 65.60% 的显著节能率。

随着煤矿智能化转型推进, 矿井通风智能化技术在实时监测、动态优化上不断突破, 成为解决复杂通风问题的重要手段。赵志瑞[8]通过现场测试和软件开发, 研究构建矿井智能通风系统, 确定总体构架, 实现风门、风窗及局部通风机等设施远程监控与智能调节, 设计多类调控子系统, 还探究了通风监测数据管控、地面主通风机控制等关键技术。张帅等[9]提出了智能化矿井通风系统的思路。首先概述井下智能化通风原理、结合矿采经验明确系统需求, 为智能管控定优化方向; 其次分析多子系统功能

与结构,完善系统框架设计;最后研究配套硬件并试用系统。杨文博等[10]采用模块化设计思路,构建了一套矿井智能通风调控系统。该系统主要包括通风机智能调速子系统、风门风窗智能控制子系统和风量参数精准监测子系统。现场应用表明,该系统实现了矿井通风系统的智能感知决策与自动执行管控。吕立斌[11]首先探讨了提升矿井通风安全性、提高矿井通风系统运行效率和节约运行成本煤矿通风智能化的重要意义;其次探讨了通风智能化的物联网、大数据分析、人工智能和自动控制等关键技术;最后指出了通风智能化的发展方向,主要包括提升智能化水平、实现全生命周期管理、增强人机协同和实现通信协议的标准化等。Feng Geng 等[12]通过对实际煤矿的研究,分析了平衡压力窗开口面积与工作面风量及等压的关系,并推导出平衡压力窗的局部阻力计算公式。采用等压局部阻力与平衡压力窗的联合调节,开发了智能等压通风系统,可以远程和智能调节采煤工作面的等压。这项研究为煤矿采煤工作面的智能等压通风提供了理论参考。Jinling Gao 等[13]通过对实际煤矿存在的问题进行了分析。从通风参数、通风动力和通风设施等方面进行了技术与设备升级。同时,将人员定位、监测监控、锚索监测等系统进行整合,建立了通风系统集中管理与控制平台,实现了通风网络的静态和动态计算及按需供风。Jingzhao Li 等[14]出了一种基于智能感知与决策的场景通风安全决策系统。首先,利用灰色关联分析和粗糙集理论从横向和纵向两个方面对决策表进行约简。然后,将约简后的数据输入基于改进的胶囊网络的矿井通风安全决策模型进行通风安全决策。实验结果表明,该系统可以显著提高矿井通风安全决策的准确性。

矿井通风节能技术围绕“按需供风、减少损耗”展开探索,目前学界与业界在变频控制、余热利用等方面积累大量研究。高建峰[15]基于物联网设计实现智能化矿井通风控制系统,通过传感器实时监测环境参数,结合边缘计算分析决策,用模糊 PID 算法调控风机变频。实验显示,系统能耗降 30%,有害气体可控,节能性与安全性显著提升。张宏利[16]通过利用自然风压、风机更新运用、通风路径优化三个方式来进行研究探讨矿井通风节能的问题,还提建议技术人员应该着重考虑到矿井通风过程中存在的明显能耗损失问题,不断提升节能效益。胡权[17]提出希望通过应用煤矿通风节能技术为建设绿色矿山贡献一份力量,同时还提出了通过加强监督管理、完善通风系统、替换风机设备等方面提出矿井通风系统节能。翟伟伟[18]通过结合生产实践解决通风阻力增大、风量不足、能耗增大以及设备运行效率低等综合问题,同时在对通风阻力、通风机运行性能参数等进行测定的基础上,结合现场条件提出了相应的优化改造措施。Yubao Cai [19]建立了一个非线性优化模型,旨在使矿井通风网络的总能耗最小化。此外,作者提出了一种改进的平衡优化器算法来解决该模型。最后结果显示,通风系统的能耗降低了 17.83%。Yunfeng Ni [20]提出基于模糊算法的带式输送机新型节能控制方法,分析其控制系统组成结构,以频率控制降能耗并匹配速运能力,结合感应电机速度公式与模糊算法完成系统,仿真显最大节能 30%,实际应用有节能效果。Babu R V [21]从合理的规划、重新设计、实施和维护角度讨论了节能的可能性,并特别介绍了通过实施各种新技术和方法来节省电力成本的潜力的调查

通过对矿井通风系统网络解算与仿真、通风智能化、节能技术三方面的国内外分析可见,网络解算与仿真已从传统算法向多场耦合仿真升级,通风智能化聚焦感知-决策-执行闭环构建,节能技术则围绕降耗与绿色转型发力。国外在技术集成与前沿算法上领先,国内更贴合复杂矿情实现实用化突破。未来需进一步推动三者深度融合,攻克多系统协同、极端工况适配等难题,为矿井通风系统高效、智能、低碳发展提供更有力的技术支撑。

3. 矿井通风系统优化技术的重要性及基本要求

3.1. 矿井通风优化技术的重要性

确保空气质量,保障人员健康;矿井生产会产生有毒有害气体和大量粉尘,威胁矿工健康。如瓦斯

易燃易爆, 一氧化碳剧毒, 通风优化技术可排出这些气体至安全范围。矿井开采产生的煤尘、岩尘等, 易致尘肺病, 良好通风系统可稀释并排出粉尘。

预防灾害发生, 保障安全生产; 可防止瓦斯积聚和爆炸, 优化通风系统确保瓦斯浓度安全, 通过监测调整通风参数降低爆炸风险。矿井火灾严重, 良好通风可控制火势蔓延, 为灭火提供条件, 合理调节通风可排出烟雾和有毒气体。矿井深度增加易致高温高湿, 影响矿工健康和工作效率, 优化通风可改善作业环境。

提高生产效率, 降低成本; 优化通风系统确保井下作业有充足氧气, 满足矿工呼吸需求, 提高工作效率和体力, 减少安全事故, 利于井下设备正常运行。通风系统能耗高, 优化通风技术可降低能耗, 提高能源利用效率, 降低成本, 良好通风条件还能提高矿井生产能力。

3.2. 矿井通风优化技术的基本要求

3.2.1. 通风系统的合理性

通风网络设计要科学。通风网络应根据矿井的地质条件、开采布局和生产计划进行合理设计[22]。确保通风线路简洁、顺畅, 减少通风阻力, 提高通风效率。例如, 在布置通风巷道时, 应尽量避免直角转弯和狭窄通道, 采用弧形弯道和宽敞的巷道断面, 以降低风阻。

通风设施要布置得当通风设施如风门、风窗、风桥等应合理布置, 确保其能够有效地调节风量和风向, 满足不同区域的通风需求。风门应安装在合适的位置, 保证其密封性良好, 防止风流短路。风窗的大小和位置应根据实际需要进行调整, 以实现精确的风量控制。风桥应设计合理, 确保通风系统的稳定性和可靠性[23]。

通风分区要明确。矿井应根据不同的开采区域和作业地点进行通风分区, 每个分区应具有独立的通风系统, 以便于管理和控制。通风分区可以有效地防止灾害事故的扩散, 提高通风系统的安全性[24]。例如, 在发生火灾或瓦斯爆炸时, 可以迅速切断事故区域的通风, 防止灾害蔓延到其他区域。

3.2.2. 通风设备的可靠性

通风机性能要优良。通风机是矿井通风系统的核心设备, 其性能直接影响通风效果。通风机应具有足够的风量和风压, 能够满足矿井不同生产阶段的通风需求。通风机应具备高效、节能、低噪音等特点, 同时还应具有良好的可靠性和稳定性, 能够长时间连续运行。

通风机配套设施要完善。通风机的配套设施如电动机、减速器、联轴器等应与通风机相匹配, 确保其能够正常运行。电动机应具有足够的功率和转速, 减速器应能够有效地降低通风机的转速, 提高扭矩。联轴器应具有良好的传动性能和可靠性, 确保通风机与电动机之间的连接牢固可靠。

3.2.3. 通风参数的适宜性

风量满足要求。矿井通风系统应提供足够的风量, 以满足井下作业人员的呼吸需求、排除有毒有害气体和粉尘、降低温度等。风量的计算应根据矿井的生产规模、开采深度、瓦斯涌出量、粉尘产生量等因素进行确定。同时, 还应考虑通风系统的漏风率和阻力损失, 确保实际风量能够满足要求。

风速合理控制。风速是衡量通风效果的重要参数之一。风速过高会导致粉尘飞扬、设备磨损加剧、人员不舒适等问题; 风速过低则会影响通风效果, 导致有毒有害气体积聚和粉尘浓度升高。风速的控制应根据不同的作业地点和通风要求进行确定。

通风压力稳定。通风压力是保证通风系统正常运行的重要因素[25]。通风压力应稳定在一定范围内, 以确保风流能够按照预定的方向和速度流动。通风压力的控制可以通过调整通风机的转速、叶片角度等方式进行。同时, 还应注意通风系统的阻力变化, 及时采取措施进行调整, 确保通风压力稳定。

3.2.4. 通风管理的有效性

矿井应健全通风管理制度,明确各部门及人员职责权限,涵盖系统设计、施工、运行、维护、检测等内容并制定应急预案。同时完善通风监测系统,对风量、风速、风压、瓦斯及粉尘浓度等参数实时监测,具备数据采集、传输、处理、显示功能以发现并处理问题。此外,通风人员需具备专业知识技能,熟悉系统原理、结构与操作,定期培训考核提升业务水平与综合素质,加强安全意识教育以保障通风工作安全可靠[26]。

4. 矿井通风系统优化技术

矿井通风系统优化技术是提升作业安全性和效率的关键。优化井巷断面、风流调节技术、系统网络及矿井设备,能降低有害气体浓度,确保空气流通,为矿工提供安全健康环境,还可减少通风系统能耗,提高运营效率,为矿井可持续发展奠定基础。

4.1. 矿井通风系统井巷断面优化

矿井通风系统的井巷断面优化至关重要。它能提高通风效率,合理断面可降低通风阻力,使空气流动顺畅,增加断面面积可提高风量满足需求。在成本方面,能降低通风设备运行功率和能耗,降低成本。优化方法有理论分析、数值模拟和现场实测等,运用流体力学和通风理论分析确定主要因素建立数学模型,数值模拟直观了解通风效果,现场实测试验验证方案可行性。

优化步骤为先确定目标收集数据,分析问题提出方案,评估方案选择最优实施,施工后监测评估。进行优化时需综合考虑通风、运输、排水等需求,确保方案可行有效,施工把安全放首位,严格遵守规程。矿井通风系统动态变化,井巷断面优化也需持续调整完善。

4.2. 矿井通风系统风流调节技术优化

在科技技术不断提高的今天,矿井风流调节技术在原有的基础上取得长足的进步[27]。风流调节技术有很多种,风流调节技术的分类及分析如下表 1 所示。

Table 1. Classification and analysis of wind flow regulation technology
表 1. 风流调节技术的分类及分析

风流调节技术	技术原理	技术优缺点	常见措施	技术适用工况
增阻调节法	风路中设置障碍物增加风阻以改变风流分配	优点: 方法简易、操作方便 缺点: 增加矿井总阻力	增加调节风窗或风帘	减少风路风量
减阻调节法	降低风路摩擦阻力以增加风量	优点: 降低通风总阻力、减少能耗, 调节效果稳定 缺点: 施工难度大、成本较高	扩大巷道断面、修复变形巷道	风路风阻大需提高风量
增能调节法	提高通风系统能量来增加风量	优点: 调节性强、灵活性高 缺点: 能耗增加、管理难度大	增加通风机风压、安装辅助通风机	原有系统难以满足风量需求时、巷道风阻增大出现风量不足情况
矿用空气幕	风机通过供风器以高风速按一定方向喷射扁平射流	优点: 无物理遮挡、节能、防结冰 缺点: 初期成本高、依赖供电	增加轴流式空气幕或离心式空气幕	用于运输巷道或易变形巷道实现风流调节与控制

4.2.1. 传统风流调节技术

对井下风量的调控,其传统的调控技术和措施较多,但存在一定因素的制约,如在主运巷中实施增阻调节、辅扇通风或者引射风流,在人行巷道中增设风门,主要作业中段安设风机等[28]。根据传统的风流调节的技术,分为以下几种[29]-[31]。

(1) 增阻调节法

增阻调节主要是在风路中设置障碍物增加风阻以改变风流分配,常见增阻设施有调节风窗、风帘等。风流经过这些设施时,因流通面积减小或摩擦阻力增大使风路风阻增加,根据风量与风阻关系,风阻增大后该风路风量减小。

增阻调节法多用于需降低特定风路风量的场景,例如当某采区风量过剩导致有害气体无法充分吹散时,可在该采区的回风巷道内设置调节风窗。采用增阻调节的巷道,通常具有风量富余的显著特点。该方法操作简单便捷,能快速满足特定区域的通风要求,但同时也会使矿井的总阻力有所上升。若矿井主通风机的特性曲线保持不变,整体进风量便会随之减少。因此,在应用此方法时,必须确保全矿的风阻参数与风机特性曲线相互适配。

(2) 减阻调节法

减阻调节核心是降低风路摩擦阻力以增加风量,主要方法有扩大巷道断面、清理巷道堆积物、修复变形巷道等。扩大断面可减小风流速度降低摩擦阻力,清理堆积物和修复变形巷道能减少风流与巷道壁摩擦,提高通风效率。

减阻调节适用于风路风阻大需提高风量的情况,如老旧矿井巷道因长期使用变形、堆积物增多致风阻增大,可通过减阻调节改善通风状况。使用减阻调节的巷道特点是能降低矿井通风总阻力、减少能耗,调节效果相对稳定,完成减阻措施后通风性能持久改善,但施工难度和成本可能较高,在地质条件复杂矿井,减阻调节效果可能受限。

(3) 增能调节法

增能调节法的核心思路,是借助提升通风系统的能量水平来实现风量增加。其具体实施措施主要包括两类:一是提高通风机自身的风压,二是在系统中安装辅助通风机,通过这两种方式均可有效达成风量提升的目标。

增加通风机风压是调整主要通风机运行参数,如提高转速、增大叶片角度等以增加风压,克服更大通风阻力,加快风流流速、增加风量,可在通风机控制系统中调整参数提高输出功率。安装辅助通风机是在特定风路安装,与主要通风机协同工作提供额外能量,可布置在进风巷道、回风巷道等关键位置,如在通风阻力大的采区或长距离巷道安装以增强局部通风能力。增能调节适用于矿井开采深度增加、通风阻力增大致原有系统难以满足风量需求时,以及新开拓采区或延伸长的巷道风阻增大出现风量不足情况。其特点是调节效果显著、灵活性高,能满足不同阶段通风需求,但能耗增加且管理难度加大。

4.2.2. 矿用空气幕的研制与运用

伴随矿业开发的快速推进,加之矿山开采深度持续加深、盘区机械化水平不断提升,矿井内部的风流调控难题逐渐凸显。在此背景下,矿用空气幕的实际应用场景将愈发广泛,其在风流管理中的作用也将进一步凸显。它是在研究大门空气幕基础上研制,用于运输巷道或易变形巷道实现风流调节与控制,依据有效压力平衡原理、射流理论和动量定律设计参数[32]。其工作原理是风机通过供风器以高速按一定方向喷射扁平射流,实现隔断风流、增阻和引射风流[33]。

矿用空气幕通常安装于巷道墙壁的硐室内部,不仅不会占用巷道的有效空间,在运行过程中也不会对行人通行与车辆行驶造成干扰,且日常管理操作便捷。其发展已从最初的单机形式,逐步拓展到多机

串联与并联的组合模式：既能够安装在巷道内通过引射风流来提升风量，也可逆向设置以增加阻力、阻隔风流，此外还具备防治井筒结冰的作用。

4.3. 矿井通风系统网络优化

矿井通风系统网络优化是矿业安全生产的关键环节，是为井下人员提供安全健康环境。该过程涉及对通风网络结构的深入分析，如风量分配、风阻计算、风流稳定性评估等，以实现通风效率最大化和能耗最小化。引入智能化监控系统，结合大数据分析和人工智能算法，可实时监测矿井环境和通风效果，实现通风系统动态调整优化，提升可靠性和经济性，为矿山可持续发展奠定基础。矿井通风网络分为自然分风、控制型分风和一般型分风三大类。矿井通风网络的分类及分析如下表 2 所示。

Table 2. Classification and analysis of mine ventilation networks
表 2. 矿井通风网络的分类及分析

矿井通风网络名称	特点	控制难度	应用场景
自然分风网络	动力来源单一、风流稳定性差、分风被动性、结构依赖性强	极高	小型非正规矿井、临时应急场景、废弃矿井或探矿巷道
控制型分风网络	动力可控、分风精准性高、抗干扰能力强、网络结构化	中等	大中型生产矿井、高风险矿井、正规地下工程
一般型分风网络	动力混合性、分风半主动性、稳定性中等、结构灵活性高	较低	中小型生产矿井、临时生产区域、低风险矿井

4.3.1. 自然分风网络

国外学者的理论研究成果显示，对于采用多进风口、多风机协同运转模式的通风网络，当矿井总风量维持恒定且各台风机的负压保持一致时，整个系统的能耗可达到最低水平。而在实际工程应用场景中，若确保矿井总风量稳定不变，且暂不纳入机械通风设备的运行影响，此时自然分风网络的能耗表现最优，自然分风网络能耗最小。自然分风网络中空气流动依靠自然风压，由矿井进回风井口标高差、温度差等引起。自然分风网络有减少通风设备能耗、降低成本且相对稳定、能为矿井提供一定通风保障等优势，但自然风压受季节、气候影响具不稳定性，且难以完全满足矿井复杂通风需求，可能需辅助机械通风确保通风效果。

4.3.2. 控制型分风网络

在控制式分风网络系统中，当各分支的风阻参数已明确时，网络内的风量分配规律与风压分布状态即可随之确定。在实际求解过程中，可借助多种成熟的线性规划方法实现精准计算，常用的技术路径包括通路分析法、回路解析法以及关键路径优化法等，这些方法能有效推导并得出符合工程需求的最优调节方案[34]。其中，关键路径法是先将通风网络的关键参数与工程网络的相关要素进行类比关联，进而搭建出对应的分析模型，通过找最大阻力线路确定主通风机最小风压及调节风窗分支，适用于单台或多台主通风机场景；通路法解算速度快、精度高，能找出关键通路的主导分支，通路指进风节点到回风节点的闭合回路。

控制型分风网络适用场景广泛，在高瓦斯矿井可保障瓦斯排放区风量合理，在复杂地质条件矿井能按需分风以预防有害气体积聚和水害，在大型矿井可高效管理通风系统。其凭借强调节性与高稳定性，通过通风设施控制和网络优化等方式，为矿井安全生产提供有力保障。

4.3.3. 一般型分风网络

一般型分风网络在自然分风基础上结合人工调节实现风量分配，既不单纯依赖自然风压，也不像控制型分风网络那样精确控制。在一般型分风网络中，通风设施如风门、风窗等有一定调节作用，但较简单有限。风量分配受通风系统布局、巷道阻力及自然风压等多种因素综合影响。

一般型分风网络优点是相对简单、成本低，适用于通风要求不严格的矿井或特定生产阶段。缺点是风量分配准确性和稳定性不足，难以满足复杂工况下的高通风要求。一般型分风网络需定期监测和维护，确保通风系统正常运行。实际应用中可根据矿井具体情况，结合其他通风优化措施提高其通风效果和可靠性。

4.4. 矿井通风系统设备优化

矿井通风需优化设备选型，依据具体需求和实际情况挑选通风机、通风管道等设备，综合考虑性能、效率、可靠性及维护成本；优化设备布局，合理布置使通风路径顺畅、减少阻力，精心设计通风机位置及风道长度形状；优化运行参数，依通风需求和设备性能调整通风机转速等，提高设备效率、降低能耗；引入智能化控制技术，实时监测控制通风系统，自动调整运行状态，提升自动化水平和可靠性。

4.5. 矿井通风系统智能化

随着矿业领域的发展，矿井通风系统智能化已成重要趋势。传统通风系统正逐步向智能化转变，其借助先进传感器技术，可实时监测井下风速、风压、瓦斯浓度等关键参数，为精准调控提供数据支撑。同时，利用大数据分析与人工智能算法，能对通风系统运行状态进行预测评估，提前排查潜在问题并及时处理。

智能通风系统还具备自动化控制功能，可依据井下实际情况，自动调节通风机运行频率与通风网络阻力分布，保障通风效果最佳，既提升通风效率、降低能耗，又强化矿井安全性。此外，该系统能与其他安全监控系统集成，构建全面的安全管理平台，通过统一管理调度提升安全生产水平。由此可见，矿井通风系统智能化是矿业可持续发展的必然方向，为矿井高效安全运行筑牢根基。矿井智能通风系统框架如下图 1 所示。

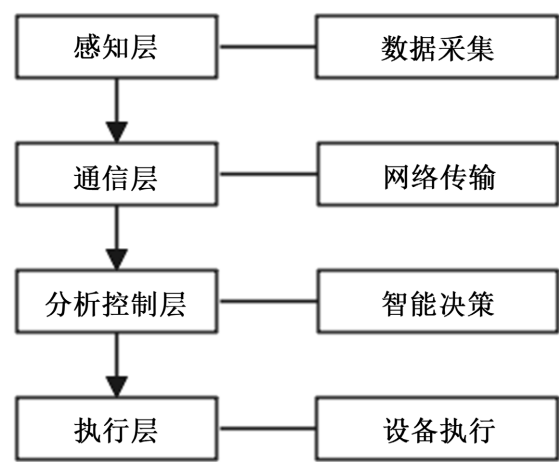


Figure 1. Diagram of intelligent mine ventilation system framework
图 1. 矿井智能通风系统框架图

5. 结论

本文通过系统梳理矿井通风系统网络解算与仿真、智能化、节能技术的国内外研究现状，明确了三

大技术领域的核心发展特征：网络解算已从传统数值算法向多物理场耦合仿真升级，能更精准刻画复杂矿情下的风流规律；通风智能化聚焦“感知-决策-执行”闭环构建，通过智能传感器、AI 算法实现通风参数实时监测与动态调控；节能技术则围绕“按需供风、减少损耗”发力，在变频控制、余热利用等方面形成诸多实用化成果。同时，本文阐述了通风系统优化的重要性——既是保障矿工健康、预防瓦斯爆炸与火灾等灾害的关键，也是提升生产效率、降低能耗成本的核心路径，并明确其需满足系统合理性、设备可靠性、参数适宜性与管理有效性的基本要求，进一步通过井巷断面、风流调节、网络结构、设备选型及智能化升级等技术路径分析，证实优化技术对矿井安全、高效运行的支撑作用。

当前矿井通风系统优化虽取得显著进展，但面对矿业深部化、智能化、绿色化的发展需求，仍存在多领域协同不足、极端场景适配性弱等挑战，未来需重点突破两大前沿议题：一是多物理场耦合下通风-智能开采系统的协同优化，深部矿井高地温、高瓦斯、高应力环境中，现有技术多单独优化通风或开采系统，需攻克多系统数据交互标准、耦合模型构建及实时调控算法，解决“通风适配开采节奏、开采兼顾通风节能”的协同难题；二是基于数字孪生的通风系统全生命周期健康管理，当前数字孪生多限于运行状态模拟，需突破物理实体与虚拟模型的高精度映射、多源异构数据融合技术，实现从“设计-建设-运行-维护-退役”全周期的健康评估与预测性维护，填补全周期数据断层空白。此外，极端灾变场景下智能通风系统的自主响应与容错控制、通风系统与新能源耦合的低碳协同技术，也需进一步探索，以推动矿井通风系统向更智能、更可靠、更低碳的方向发展。

参考文献

- [1] 孔猛, 朱思超, 张乾, 等. 基于网络解算的矿井通风系统优化改造研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(13): 101-104.
- [2] 马跃晋. 基于 BP 神经网络的矿井瓦斯通风网络风流密度预测方法与应用[J]. 山西化工, 2025, 45(7): 229-231.
- [3] 杨满斌, 门雷鸣. 煤矿通风网络优化与智能监控技术应用[J]. 大众标准化, 2025(12): 42-44.
- [4] 王宇. 矿井通风网络可靠性分析[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(6): 70-72.
- [5] Sun, Q. and Wang, Y. (2025) Optimization of Airflow Distribution in Mine Ventilation Networks Using the MOBWO Algorithm. *Processes*, **13**, Article 2193. <https://doi.org/10.3390/pr13072193>
- [6] Cotrina, M., Mamani, J., Arango, S., Marquina, J., Noriega, E., Cano, D., *et al.* (2025) Optimise a Ventilation System in Underground Mines Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, **16**, 131-147. <https://doi.org/10.1504/ijmme.2025.146855>
- [7] Wen, L., Zhong, D., Bi, L., Wang, L. and Liu, Y. (2024) Optimization Method of Mine Ventilation Network Regulation Based on Mixed-Integer Nonlinear Programming. *Mathematics*, **12**, Article 2632. <https://doi.org/10.3390/math12172632>
- [8] 赵志瑞. 智能通风系统构建方法及关键技术研究[J]. 能源与节能, 2025(7): 65-67+255.
- [9] 张帅, 韦一. 智能化矿井通风系统的设计[J]. 能源与节能, 2025(6): 145-148.
- [10] 杨文博, 刘海胜, 陈诚. 矿井智能通风调控系统设计及应用[J]. 矿山机械, 2025, 53(6): 62-66.
- [11] 吕立斌. 煤矿通风智能化与发展方向研究[J]. 能源与节能, 2025(4): 131-133+206.
- [12] Geng, F., Li, W., Liu, Y., *et al.* (2025) Intelligent Equalizing Pressure Ventilation System for Coal Mine: A Case Study of the 104 Coal Mining Face in Shige Tai Mine. *Energy Reports*, **13**, 4998-5005.
- [13] Gao, J., Fu, Y. and Meng, X. (2023) Intelligent Upgrade and Application Effect Analysis of Ventilation System in Yanan Coal Mine. *International Journal of Frontiers in Engineering Technology*, **5**, 5-12.
- [14] Li, J. and Li, T. (2021) A Decision System Based on Intelligent Perception and Decision for Scene Ventilation Safety. *International Journal of Computational Science and Engineering*, **24**, 162-170. <https://doi.org/10.1504/ijcse.2021.115102>
- [15] 高建峰. 基于物联网技术的煤矿矿井通风系统节能与安全控制[J]. 能源与节能, 2025(6): 101-103.
- [16] 张宏利. 矿井通风技术及通风系统节能技术探讨[J]. 山西化工, 2025, 45(1): 215-217.
- [17] 胡权. 绿色矿山建设中煤矿通风系统节能技术的研究[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(1): 138-140+143.
- [18] 翟伟伟. 矿井通风系统节能技术的应用与实践[J]. 能源与节能, 2024(4): 87-89+119.

-
- [19] Yu, B. and Shao, L. (2022) A Mine Ventilation System Energy Saving Technique Based on an Improved Equilibrium Optimizer. *Frontiers in Energy Research*, **10**, Article ID: 913817. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.913817>
- [20] Ni, Y. and Chen, L. (2021) Research of Energy Saving Control System of Mine Belt Conveyors. *Proceedings of 2021 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS 2021)* Part II, Xi'an, 27-28 March 2021, 579-581.
- [21] Babu, V.R., Maity, T. and Prasad, H. (2015) Energy Saving Techniques for Ventilation Fans Used in Underground Coal Mines—A Survey. *Journal of Mining Science*, **51**, 1001-1008. <https://doi.org/10.1134/s1062739115050198>
- [22] 贾赵飞. 煤矿矿井通风系统优化策略[J]. 矿业装备, 2024(2): 107-109.
- [23] 王泽华. 多风机耦合作用下复杂通风系统可靠性研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- [24] 房万伟, 谢景娜. 矿井通风与重特大事故之间的关系[J]. 能源技术与管理, 2012(1): 102-104.
- [25] 马俊丽. 影响煤矿通风系统安全运行的因素[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(5): 131-133.
- [26] 王飞. 煤矿开采过程中“一通三防”工作的危险源及预控措施[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(8): 85-87.
- [27] 赵学龙. 金属矿井通风系统的优化设计研究[J]. 世界有色金属, 2017(19): 167+169.
- [28] 李磊, 黄园月, 宝海忠. 金属矿山井下压风自救系统参数设计[J]. 金属矿山, 2012(8): 150-152.
- [29] 彭斌. 大型复杂矿井通风系统优化研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
- [30] 吴风国. 矿井通风系统安全评价与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- [31] Qi, Z. and Xinghua, L. (2023) Study on Optimization Regulation Algorithm and Application of Mine Ventilation System. Shandong University of Science and Technology.
- [32] 王海宁, 程哲. 空气幕研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(3): 40-46.
- [33] 张鹏飞. 双柳煤矿通风系统优化改造[J]. 煤炭科技, 2017(2): 150-152.
- [34] 库向阳, 常新坦, 孙艺珍. 基于遗传算法的通风网络两步法风流调节优化算法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(9): 2729-2736.