

基于三维矿井通风决策平台的系统优化研究

赵雨菲¹, 汝佳慧²

¹成达矿业有限公司陶忽图煤矿通防工作部, 内蒙古 鄂尔多斯

²安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年8月10日; 发布日期: 2026年9月11日

摘要

针对某煤矿通风系统面临的进回风巷道风速超限、采区微风及用风地点风量紧张等问题, 本文通过三维模拟方法开展系统优化研究。利用自研三维矿井通风决策平台建立仿真模型, 提出北部二号回风斜井投运方案: 方案I (分担一采区北部和34采区回风)通过优化通风网络分工, 缩短通风路径, 降低系统冗余阻力, 实现北部矿井总进风量提升至 $24,840 \text{ m}^3/\text{min}$, 回风系统能力提高35%~40%。研究表明, 方案I可均衡风量分配, 缓解北部一号回风斜井压力, 且主通风机运行效率达行业领先水平, 为类似矿井通风系统改造提供了“阻力测定-三维建模-动态调控”的全流程技术参考。

关键词

通风系统, 三维通风决策平台, 系统优化, 回风斜井投运

Research on System Optimization Based on Three-Dimensional Mine Ventilation Decision Platform

Yufei Zhao¹, Jiahui Ru²

¹Chengda Mining Co., Ltd. Taohutu Coal Mine Ventilation and Prevention Work Department, Ordos Inner Mongolia

²School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: July 6, 2026; accepted: August 10, 2026; published: September 11, 2026

Abstract

To address challenges in coal mine ventilation system—including excessive air velocities in intake and return airways, insufficient airflow in mining areas, and constrained air supply at usage points,

文章引用: 赵雨菲, 汝佳慧. 基于三维矿井通风决策平台的系统优化研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1325-1333.

DOI: 10.12677/me.2026.145131

the study employs a 3D simulation approach for system optimization. Using a self-developed 3D mine ventilation decision-making platform, a simulation model was established to propose an operational plan for the Northern No. 2 Return Air Inclined Shaft: Plan I (which shares return air flows from the northern section of Mining Area 1 and Mining Area 34) optimizes network distribution, shortens ventilation paths, reduces system redundant resistance, and increases total mine intake airflow to 24,840 m³/min while enhancing return air system capacity by 35%~40%. The research demonstrates that Plan I achieves balanced airflow distribution, alleviates pressure in the Northern No. 1 Return Air Inclined Shaft, and delivers main ventilator efficiency at industry-leading levels, providing a comprehensive technical reference encompassing “resistance measurement-3D modeling-dynamic regulation” for ventilation system upgrades in similar mines.

Keywords

Ventilation System, Three-Dimensional Ventilation Decision-Making Platform, System Optimization, Return Air Inclined Shaft Put into Operation

Copyright © 2026 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. 绪论

随着数值模拟技术、智能化方法及新型检测手段的飞速发展,相关研究在系统优化设计与动态调控等领域取得了显著进展,构建了从理论到实践的完整优化链条。Ventsim 软件凭借其强大的三维建模与网络解算能力,已成为主流工具。王兵建等[1]基于 Ventsim 构建了王家塔煤矿的三维模型,通过调整风窗面积和增设并联巷道,成功将总阻力降低 6.4%,有力验证了仿真优化的有效性。掌奕然等[2]利用 Ventsim 对济宁二号煤矿进行改造,优化后南翼轨道大巷阻力大幅降低 32.7%,工作面风量显著提升 19.8%。虎啸等[3]提出了融合通风参数实时监测与动态解算的智能决策平台,实现了故障诊断与风量的精准调节。高阳[4]针对阳泉五矿的高风阻问题,提出增设并联巷道并调整风机角度,使总阻力降低 36.8%。张浪[5]通过优化传感器布局与解算模型,有效解决了巷道断面风速不均的问题,将误差严格控制在 0.1 m/s 以内。

良好的矿井通风系统是确保煤矿安全、高效和经济生产的关键前提[6][7]。然而,随着煤层的持续开采,通风系统常面临诸多挑战,如总进风巷道与总回风巷道风速超限、采区内多条巷道出现微风现象,以及用风地点风量紧张等[8][9]。针对上述问题,研究矿井拟将北部二号进风斜井改造为回风斜井,通过优化回风系统布局破解通风能力不足的难题。本文基于自研三维矿井通风决策平台,构建研究矿井全尺度三维通风仿真模型,对北部二号回风斜井投运后的全矿通风特性开展模拟分析,设计两套分区式回风方案并完成方案比选论证,最终提出最优投运方案与系统调整策略,以期同类矿井的通风系统改造提供工程参考。

2. 矿井基本情况调查

2.1. 矿井通风系统

1) 通风系统类型(方式)

对角式通风。

2) 通风方法

抽出式。

3) 主要进回风井特征参数

主斜井、副斜井、北部进风斜井及北部二号回风斜井为四个进风井筒, 中部回风斜井及北部一号回风斜井为两个回风井筒。

主要进回风井筒参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of the main inlet and return shafts of the mine

表 1. 矿井主要进回风井参数表

井筒名称	地面 标高/m	落地 标高/m	井筒 长度/m	面积 /m ²	风速 /m/s	风量 /m ³ /s	备注
主斜井	1430.1	1155.0	1174.7	17.0	3.7	64.5	进风、运煤
副斜井	1428.0	1158.0	3230.2	18.9	6.7	127.1	进风、运人
北部进风斜井	1404.5	1281.0	357.4	20.1	7.5	152.4	进风
中部回风斜井	1411.0	1184.0	1020.4	17.9	6.0	107.9	回风
北部一号回风斜井	1403.8	1290.0	287.8	17.8	13.5	241.4	回风
北部二号回风斜井	1404.5	1195.0	388.0	17.1	0.2	3.5	进风

2.2. 矿井开拓、开采情况

某煤矿采用斜井单水平上、下山开拓方式。在井田中部工业场地, 布置了三条井筒: 主斜井、副斜井和中部回风斜井, 其中主斜井与副斜井作为进风井筒, 中部回风斜井则专司回风。井田北部工业场地同样设有三条井筒: 北部一号回风斜井、北部二号回风斜井以及北部进风斜井。矿井设计生产能力为 4.00 Mt/a, 2022 年 1 月核定生产能力提升至 4.40 Mt/a, 核增后剩余服务年限达 46.7 年。

某煤矿目前运营两个 18#煤层工作面, 分别采用走向长壁后退式综采放顶煤工艺和走向长壁后退式自动化回采工艺, 并通过全部垮落法管理采空区。全年掘进工作面最多可同时施工 10 个, 现有 8 个综掘工作面, 其中煤(半煤岩)巷与岩巷各占 4 个, 另设有 2 个炮掘岩巷工作面。

2.3. 自研三维矿井通风决策平台技术体系

本文所用三维矿井通风决策平台是针对国内煤矿通风管理需求开发的本土化仿真与管控系统, 所有计算逻辑均符合《煤矿安全规程》¹《煤矿井工开采通风技术条件》(AQ 1028-2006)²等国内行业规范, 其核心技术体系如下:

1) 核心理论基础

平台以矿井通风三大基本定律(风量平衡定律、风压平衡定律、阻力定律)为核心理论支撑, 耦合流体力学、网络拓扑学、三维 GIS 技术, 覆盖正常通风与灾变通风全场景计算需求, 可实现从三维建模、网络解算到智能决策的全流程闭环。

2) 核心算法模型

① 三维快速建模算法: 基于 AutoCAD 二维采掘平面图与通风系统图, 通过三维多段线拓扑重构技术自动生成巷道三维实体模型, 可自动完成节点合并、拓扑关系校验, 建模效率较传统手动建模提升 60% 以上, 支持任意复杂矿井的风网数字化还原。

② 通风网络解算算法: 采用改进的节点风压迭代法, 支持多风机联合工况、角联分支、可调风窗等

¹https://www.mem.gov.cn/gk/zfxgkpt/fdzdgknr/gz11/202508/t20250804_553279.shtml

²<https://hbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/258e7409373028ac0fe170d18a400578>

复杂风网的快速稳定解算，解算精度满足工程误差要求，单矿井全风网解算耗时不超过 10 s，可支撑实时在线解算需求。

③ 智能故障诊断算法：基于风网拓扑关系与监测数据反向溯源，可自动识别风流短路、独头巷道、微风巷道、设施漏风等故障类型，支持故障影响范围自动圈定与处置建议生成。

④ 灾变演化与逃生规划算法：采用非稳态通风网络计算模型，可模拟火灾、爆炸、透水等灾变下的烟流蔓延过程，结合人员位置信息自动规划最优逃生路线，支持动画演示与路径导出。与国外主流通风仿真软件 Ventsim 相比，本平台的本土化优势如下表 2 所示。

Table 2. Comparison between self-developed platform and Ventsim technology

表 2. 自研平台与 Ventsim 技术对比

对比维度	自研三维矿井通风决策平台	Ventsim
规范适配性	内置国内煤矿全套通风标准，自动校验合规性	国外通用标准，需手动适配国内规范
功能集成度	集建模、解算、监测、诊断、灾变、调控于一体	以建模与稳态解算为主，拓展功能需额外采购
系统对接	原生适配国内安全监控、人员定位系统数据接口	需定制化开发对接接口，成本较高
应用成本	国产化授权，运维成本低	进口软件采购与服务成本高昂
定制化能力	可针对矿井个性化需求快速功能迭代	标准化产品，定制修改周期长、成本高

3. 通风系统优化模拟研究

课题组利用自研的三维矿井通风决策平台，在建立矿井通风系统三维模型和通风网络模型的基础上，对北部二号回风斜井挂网运行前后通风系统进行了仿真模拟，并找出现状存在的问题。某煤矿三维数字模型如图 1 所示。



Figure 1. A coal mine 3D graphics drawing platform interface

图 1. 某煤矿三维立体图形绘制平台界面

3.1. 现状分析与问题诊断

3.1.1. 通风阻力分布特征

特征 1: 矿井通风结构已从 4 进 2 回调整为 3 进 3 回；中部矿井采用 2 进 1 回配置，活动采区为 1.5 个，风量需求较低，主要通风机及巷道通风能力均较为充裕；北部矿井目前为 2 进 1 回，活动采区达 2.5 个，风量需求较大，系统回风略显紧张。如图 2 所示。

特征 2: 北部进风斜井的风速已高达 7.2 m/s，逼近风速上限；中部进风斜井尚存一定提升空间，但副斜井风速同样达到 6.7 m/s，上升余地较小；主斜井风速为 3.7 m/s，若风速过高，可能影响矿井环境质量。此外，短期内中部矿井需风量相对稳定，而北部矿井需风量较大；由于中部进风斜井距离北部较远，通风流程漫长、阻力显著，进风量受到限制。

特征 3: 北部二号回风斜井主要通风机挂网运行对中央回风斜井的影响：

① 当矿井总风量保持恒定时，北部二号回风斜井的主要通风机挂网运行，对中部矿井的影响微乎其微，甚至毫无影响。

② 当矿井总风量提升时，若北部二号回风斜井的主要通风机投入运行，将促使中部进风斜井的风量增大，同时进风阻力也随之上升。倘若不对中部回风斜井的角度或频率进行相应调整，则中部一采区采煤工作面的风量将难以达到要求。

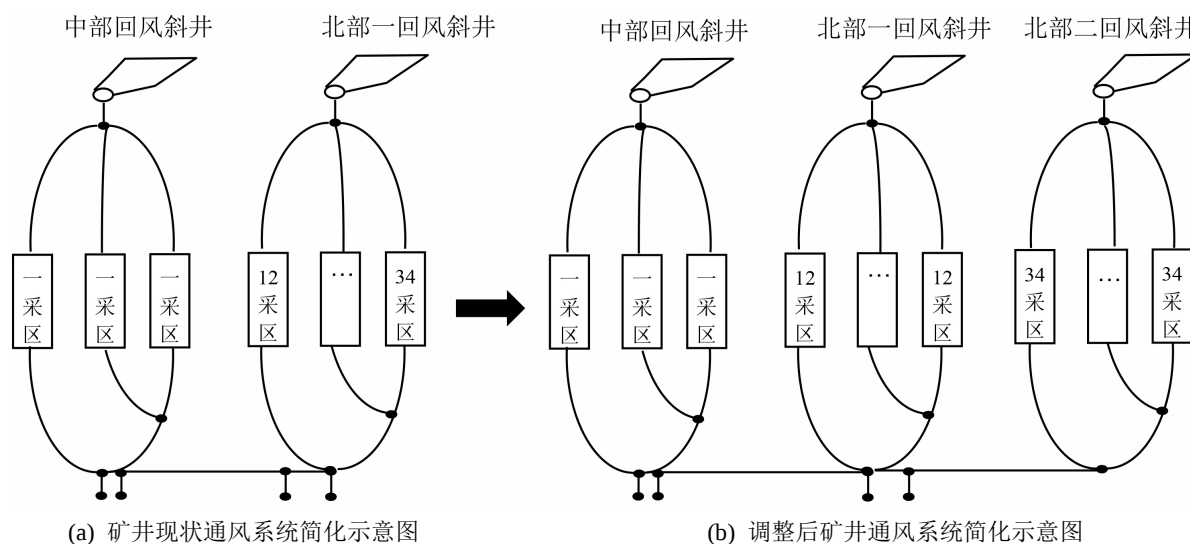


Figure 2. Simplified diagram of ventilation system of the mine
图 2. 矿井通风系统简化示意图

特征 4: 北部二号回风斜井主要通风机投入运行后，对北部一号回风斜井的通风状况产生了直接影响。原北部一号回风斜井系统中，通风阻力较大的路径位于一采区 011817 工作面。

① 如果北部二号回风斜井担负一采区北部的回风，则北部一号回风斜井调节量较大，通风困难路线经过 21 采区；

② 如果北部二号回风斜井仅担负 34 采区回风，则北部一号回风斜井调节量较小，通风困难路线仍经过 011817 工作面。

3.1.2. 通风阻力分布规律

北部一号回风斜井当前负责 21 采区、34 采区及一采区北部的通风任务。通风困难路线途经一采区

北部的 011817 工作面, 通风距离长达 11658.4 米, 阻力为 1736 Pa, 自然风压为-7 Pa。随着 34 采区开拓开采的持续推进, 北部系统所需风量日益增长, 这可能导致北部一号回风斜井的风速超出安全限值, 并引发北部进风巷和回风巷的阻力进一步上升。届时, 北部一号回风斜井的主要通风系统将难以满足相应的阻力需求。

Table 3. Distribution table of three zones of difficult ventilation routes in the north No. 1 return slant shaft
表 3. 北部一号回风斜井通风困难路线三区分布表

	区段	始末点	阻力 /Pa	所占比例 /%	长度 /m	所占比例 /%	百米阻力 /Pa/hm
北部矿井 011817 工作面	进风段	28~59	704	40.5	6807	58.3	10
	用风段	59~65	134	7.7	2506	21.4	5
	回风段	65~991	898	51.8	2345	20.3	38
	合计	28~991	1736	100	11658	100	14

由表 3 可以看出, 北部一号回风斜井通风困难路线回风段占比达到 51.8%, 平均百米阻力为 38 Pa, 是系统平均百米阻力的近 3 倍, 是进风段平均百米阻力的近 4 倍, 是用风段平均百米阻力的近 8 倍。

3.2. 北部二号回风斜井挂网运行方案设计

从通风网络的结构与位置关系来看, 34 采区由北部二号回风斜井负责, 21 采区由北部一号回风斜井负责。而一采区北部的用风, 既可由北部二号回风斜井承担, 也可由北部一号回风斜井承担。

综上所述, 北部二号回风斜井主要通风机挂网运行时可以制定以下匹配方案:

方案 I: 北部一号回风斜井 21 采区回风, 北部二号回风斜井同时担负一采区北部和 34 采区回风, 如图 3 所示。

方案 II: 北部一号回风斜井同时担负一采区北部和 21 采区回风, 北部二号回风斜井担负 34 采区回风, 如图 4 所示。

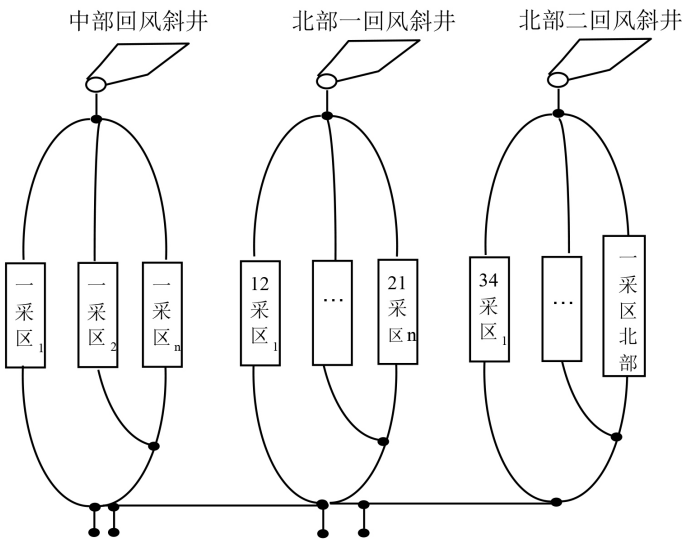


Figure 3. Scheme I simplified schematic diagram of mine ventilation system
图 3. 方案 I 矿井通风系统简化示意图

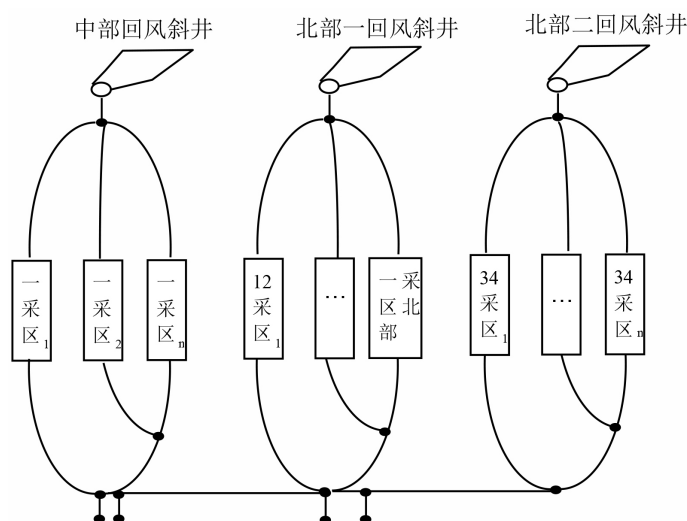


Figure 4. Scheme II ventilation system simplified schematic diagram

图 4. 方案 II 通风系统简化示意图

3.3. 挂网运行方案模拟结果与优选

3.3.1. 挂网运行必要性分析

模拟结果显示, 受北部一号回风斜井主要通风机能力制约, 北部采区的风量供应已趋于紧张, 尤其随着 34 采区需风量的攀升, 北部风量紧张态势进一步加剧。北部通风的瓶颈集中于一采区北部, 该区域通风路径长, 风量需求高。若北部二号回风斜井主要通风机未能挂网运行, 34 采区每增加 $1000 \text{ m}^3/\text{min}$ 的风量, 将导致一采区北部风量减少 $730 \text{ m}^3/\text{min}$, 011817 采煤工作面风量降低 $420 \text{ m}^3/\text{min}$, 严重阻碍采煤工作面的正常回采。因此, 加速推进北部二号回风斜井主要通风机的挂网运行至关重要。

3.3.2. 对既有回风系统的影响

北部二号回风斜井挂网后, 对中部回风斜井的影响几乎可以忽略不计, 对其所负责的采煤工作面风量的干扰也相当有限; 然而, 对北部一号回风斜井的影响则十分显著。总体来看, 北部一号回风斜井负责的采区范围缩减, 用风点位减少, 所需风量逐步下降, 此时应适时调低该井主要通风机的角度; 若不调整北部一号回风斜井主要通风机的角度, 则北部整体回风量将较挂网前增大, 进而对中部回风斜井造成轻微扰动。因此, 在北部二号回风斜井主要通风机挂网之后:

① 在北部需风量未增加的情况下, 建议适当调低北部一号回风斜井主要通风机的角度, 同时保持中部回风斜井主要通风机的角度不变。

② 当北部风量需求增加时, 应依据实际需求调整北部一号回风斜井的主要通风机角度; 同时, 针对中部回风斜井采掘工作面的具体情况, 相应上调其通风机角度。

3.3.3. 方案综合优选

方案 I 在诸多关键领域均表现卓越, 强烈建议予以优先考虑。首先, 该方案的回风系统设计均衡合理, 每个系统独立负责一个主力采区及对应回采工作面, 分工明确, 采区规划科学, 网络架构简洁高效。其次, 各系统均能胜任复杂通风路线, 调节需求极低, 通风路径采用最优流程, 从而显著提升运行效率; 北部一号、二号回风斜井的主通风机及配套电机效率达到行业领先水平, 进一步保障了系统稳定性。经济性方面, 方案 I 与方案 II 的长期运行成本基本持平, 但前者通过优化布局有效减少了冗余能耗。需注意的是, 北部集中回风大巷封闭涉及现有注浆管路, 可能增加局部维护难度, 但通过定向加固和监测可

有效管控风险。综合评估, 方案 I 在系统性、经济性与技术适配性上优势突出, 可作为优选实施方案。结合平台输出数据整理得到的矿井通风系统关键指标综合对比情况如表 4 所示。

Table 4. Comprehensive comparison of core indexes of mine ventilation system under different working conditions
表 4. 矿井通风系统不同工况下核心指标综合对比

指标类别	具体指标	改造前现状	方案 I	方案 II
系统格局	进回风井配置	4 进 2 回	3 进 3 回	3 进 3 回
总量能力	矿井总进风量提升	基准水平	提升至 24,840 m ³ /min	提升幅度较小
井筒运行	北部一号回风斜井风速	13.5 m/s, 接近限值	显著下降, 回归合理区间	小幅下降, 仍偏高
	北部二号斜井功能	进风, 利用率低	回风, 能力充分释放	回风, 负荷偏低
阻力特性	北部困难路线总阻力	1736 Pa	大幅降低	小幅降低
	回风段百米阻力	38 Pa/hm	明显下降	下降不明显
风机性能	主通风机运行效率	基准水平	行业领先	中等偏上
系统能力	回风系统能力提升	-	35%~40%	15%~20%
生产影响	采区间风量挤占效应	严重	基本消除	部分缓解
管理难度	系统调节工作量	大	极小	较大

4. 结论

1) 通过通风阻力测定及现状分析, 中部矿井通风困难路线阻力为 1018 Pa, 北部矿井为 1736 Pa, 均符合 AQ1028-2006 标准。北部矿井回风段阻力占比高达 51.8%, 百米阻力达 38 Pa/hm, 是系统阻力的主要来源。

2) 北部一号回风斜井当前已接近通风能力极限, 若 34 采区需风量增加, 将导致一采区北部风量大幅下降(每增加 1000 m³/min 需风量, 011817 采煤工作面风量减少 420 m³/min)。投运北部二号回风斜井可分担回风压力, 避免北部进风巷道和回风巷道风速超限。

3) 北部二号回风斜井投入运行后, 若北部所需风量保持不变, 则需要相应调低北部一号回风斜井主要通风机的角度; 倘若北部需风量有所增加, 则北部与中部的回风斜井风机角度也需同步进行相应调整。

4) 挂网运行方案 I (北部二号回风斜井负责一采区北部和 34 采区, 北部一号回风斜井负责 21 采区) 脱颖而出作为最优选择: 其分工明确, 通风路径最为短捷, 调节需求极低, 系统运行效率达到行业领先水平; 同时, 北部集中回风大巷的封闭风险可通过定向加固和实时监测进行有效管控。方案 II (北部二号回风斜井仅负责 34 采区) 由于北部一号回风斜井负担过重, 未被采用。

参考文献

[1] 王兵建, 刘煜成, 高运增, 等. 基于 Ventsim 的王家塔煤矿通风系统优化研究[J]. 中国矿业, 2024, 43(2): 145-149.
[2] 掌突然, 陶维国, 郭传清, 等. 济宁二号煤矿通风系统优化改造[J]. 工矿自动化, 2023, 49(8): 134-141.
[3] 虎啸, 王宁. 煤矿通风系统优化与智能化管理[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(S2): 33-36.
[4] 高阳. 高风阻煤矿通风系统的优化设计[J]. 现代矿业, 2024, 40(9): 77-80.
[5] 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): 101-107.
[6] 王玉和, 张普, 陈文国. 气压计基点法在矿井通风阻力测定中的应用[J]. 煤炭技术, 2015, 34(3): 122-125.

- [7] 严祯荣, 罗晓明, 侯怀书. 气力输送小流量煤粉在线流量超声测量[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 122-124.
- [8] 郭明明. 基于压差计法的矿井通风阻力测定与降阻技术研究[J]. 能源与环保, 2024, 46(12): 90-94+103.
- [9] 张迪, 郑义. 基于合作博弈法的 RBF 神经网络矿井通风系统风险监测预警模型[J]. 能源与环保, 2024, 46(11): 11-15.