

复杂矿井通风网络巷道重要度评估

刘军伟¹, 孙彦波¹, 陈家豪^{2,*}, 吴泽平²

1. 山西潞安环保能源开发股份有限公司王庄煤矿, 山西 长治 046031
2. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083

摘要:为了解决复杂矿井通风系统中巷道重要度评估不客观、关键巷道识别不准确的问题,本文基于复杂网络理论与级联失效分析,提出了一种以巷道重要度为权重的加权评估方法,并以王庄煤矿71采区为例,基于巷道综合重要度的加权评估对通风网络解算模型进行了修正,研究结果表明,巷道综合重要度呈现“进回风立井>回风巷>工作面>进风巷”的规律;修正后的模型可靠度由5.7%提升至2.6%,模拟精度显著提高。研究结果能够有效识别通风系统中的关键巷道,增强解算模型的可靠性与适用性,为矿井通风系统的优化设计提供依据。

关键词:复杂矿井;通风网络解算模型;巷道重要度;可靠性评估

Importance assessment of tunnels in complex mine ventilation networks

Junwei Liu¹, Yanbo Sun¹, Jiahao Chen^{2,*}, Zeping Wu²

1. Wangzhuang Coal Mine, Shanxi Lu'an Environmental Protection and Energy Development Co., Ltd.,
Changzhi 046031, China

2. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology
(Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: To address the issues of subjective assessment of roadway importance and inaccurate identification of key roadways in complex mine ventilation systems, this paper proposes a weighted assessment method based on roadway importance, based on complex network theory and cascading failure analysis. Taking the 71 mining area of Wangzhuang Coal Mine as an example, the ventilation network solution model was revised based on the weighted assessment of the comprehensive importance of the roadways. The results show that the comprehensive importance of the roadways follows the pattern of "inlet and return air shaft > return air roadway > working face > inlet air roadway." The revised model reliability increased from 5.7% to 2.6%, significantly improving simulation accuracy. This research effectively identifies key roadways in the ventilation system, enhances the reliability and applicability of the solution model, and provides a basis for the optimal design of mine ventilation systems.

Key words: Complex mine; Ventilation network solution model; Tunnel importance; Reliability assessment

矿井通风系统是煤矿安全生产的关键保障,其运行状况直接关系到作业环境的安全性和生产效

率^[1, 2]。随着开采深度增加和布局复杂化, 通风网络结构愈加庞大, 风阻分布与动力匹配问题突出, 局部风流紊乱和能耗升高等现象频繁发生, 给矿井安全带来潜在风险。在高瓦斯矿井中, 通风系统的稳定性与可靠性更显重要^[3]。因此, 构建能够真实反映通风现状的数值模型, 并开展可靠性评估, 对于保障矿井长期稳定运行具有重要意义。

智能化转型背景下, 数值模型已成为智能通风的核心基础。依托三维仿真平台, 模型不仅能够直观呈现井下风流分布, 还能为通风优化与应急决策提供支撑。然而, 矿井通风条件受采掘活动影响不断演变, 新巷道的形成与旧巷道的封闭均会改变网络拓扑与风量分配, 导致模型与实际存在偏差, 削弱其实时性与可靠性^[4, 5]。如何在动态条件下保持模型的准确性与可用性, 已成为智能通风发展的关键问题。

遗传算法、粒子群优化和蚁群算法等方法在提高解算精度和收敛效率方面取得积极成效^[6, 7]。同时, 可靠性评估理论逐渐引入通风研究, 学者们利用极限理论、复杂网络理论和稳定性判别方法对通风系统的稳健性进行了探讨^[8]。此外, 学者在 Ventsim 等仿真平台上开展建模与优化研究, 取得了一系列进展^[9]。但现有研究仍存在局限, 多数评估仅针对主要进回风巷道的风量偏差, 忽视了不同巷道在系统中的作用差异, 难以全面反映模型可靠性。

王庄煤矿是典型的多风井复杂通风系统, 其网络规模大、配风矛盾突出, 数值模型在实际评估过程中发现, 主要进回风巷道选取较为困难, 且评估方法不够全面, 模型中部分未评估巷道风量与实际偏差较大。基于此, 本文以王庄煤矿矿井通风系统为研究对象, 基于复杂网络节点和边的重要度确定理论, 结合巷道在矿井通风系统中的空间结构和风量供给能力, 提出矿井通风系统巷道重要度评估方法对王庄煤矿巷道在矿井通风网络中的重要度进行确定, 以此为权重对矿井通风网络解算模型的可靠性进行评估。

1 矿井通风系统巷道重要度评估模型

矿井通风系统由进风巷、回风巷及各类联络巷道构成, 具有复杂的网络拓扑特征。不同巷道在系统中承担的功能存在差异, 其重要性直接关系到风流分配和通风安全^[10, 11]。巷道重要度可从结构特性和功能作用两个方面进行表征。结构特性反映巷道在通风网络中的位置与连接关系, 功能作用则体现巷道在风量输送与通风安全中的贡献。二者结合, 可形成对巷道重要度的综合度量。

1.1 结构重要度

基于复杂网络理论, 利用节点中心性参数对巷道结构地位进行量化。常用指标包括: 1) 度中心性, 用于衡量巷道连接数量; 2) 介数中心性, 反映巷道在风路路径中的控制程度; 3) 紧密中心性, 表征巷道与系统中其他节点的距离远近。

结构重要度可定义为多指标加权结果:

$$I_s = \alpha C_d + \beta C_b + \gamma C_c \quad (1)$$

式中, C_d 、 C_b 、 C_c 分别为度、介数和紧密中心性; α 、 β 、 γ 均为权重系数。

1.2 功能重要度

功能重要度通过模拟某一巷道失效对系统风量分配的影响来确定。当某条巷道被密闭时, 通风网络发生级联效应, 其余巷道风量波动程度可用于衡量该巷道的功能重要性。功能重要度定义为:

$$I_f = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta Q_i|}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (2)$$

式中, Q_i 为第 i 条巷道原始风量; ΔQ_i 为其在目标巷道失效后风量的变化。

1.3 巷道综合重要度

为全面反映巷道在系统中的作用, 采用结构重要度与功能重要度的加权融合^[12]:

$$CI(i) = W_1 SI(i) + W_2 \overline{\Delta Q_i} \quad (3)$$

式中, $CI(i)$ 为对于第 i 个项的综合指标; $SI(i)$ 为对于第 i 个项的单一指标; W_1 为 $SI(i)$ 在综合指标中的贡献权重; W_2 为 ΔQ_i 在综合指标中的贡献权重。

基于上述评估模型, 可计算各巷道的重要度并进行排序, 以此识别关键巷道。在通风网络解算模型可靠性评估中, 将综合重要度作为权重引入, 可更科学地反映不同巷道误差对整体模型可靠度的影响, 为通风系统优化与重点监测提供依据。

2 实例分析

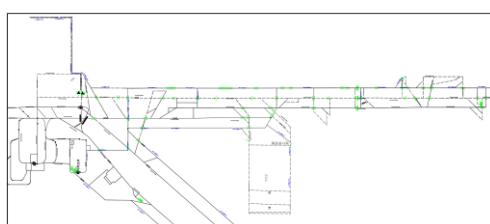
2.1 矿井概况

王庄煤矿采用立井与斜井混合开拓方式, 现有井筒 11 个, 包括主立井、副立井、副斜井、主斜井、西进风井、北栗进风立井、西回风立井、540 副立井、62 回风立井、540 回风立井及北栗回风立井, 构建了多风井联合通风格局。矿井通风方式为抽出式, 配备 4 个主要通风子系统, 分别承担不同采区的进、回风任务。随着采区延伸和巷道拓展, 通风网络规模不断扩大, 风流分配与阻力匹配问题愈加突出。

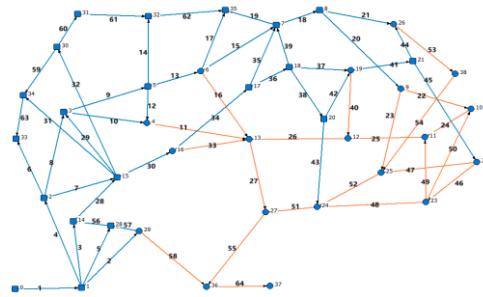
71 采区位于+540 m 水平, 主要采用综采放顶煤开采方式。采区通风结构以进风斜井和主立井供风, 经运输巷、联络巷分配至各工作面后汇入回风巷排出井口。由于采区范围大、回风线路复杂, 风量分配不均, 因此选取 71 采区作为研究对象开展巷道重要度计算。

2.2 71 采区巷道重要度计算

王庄煤矿 71 采区的节点示意图如图 1 所示, 其中包含风量关键节点 39 个与通风巷道 64 条。其中, 节点 1 和节点 36 分别对应进风井口与回风井口, 节点 0–1 代表 540 进风立井, 节点 36–37 则表示 540 回风立井。



(a) 通风系统图



(b) 拓扑结构图

图 1 71 采区矿井通风网络拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure of the mine ventilation network in the 71 mining area

依据 71 采区节点示意图的空间结构, 构建其关联矩阵与邻接矩阵, 以数学形式刻画各节点间的连接关系。在此基础上, 利用矿区节点信息及邻接矩阵数据, 通过 Ucinet 软件计算各节点的三类中

心度指标值。各节点的重要度指标如图 2 所示。

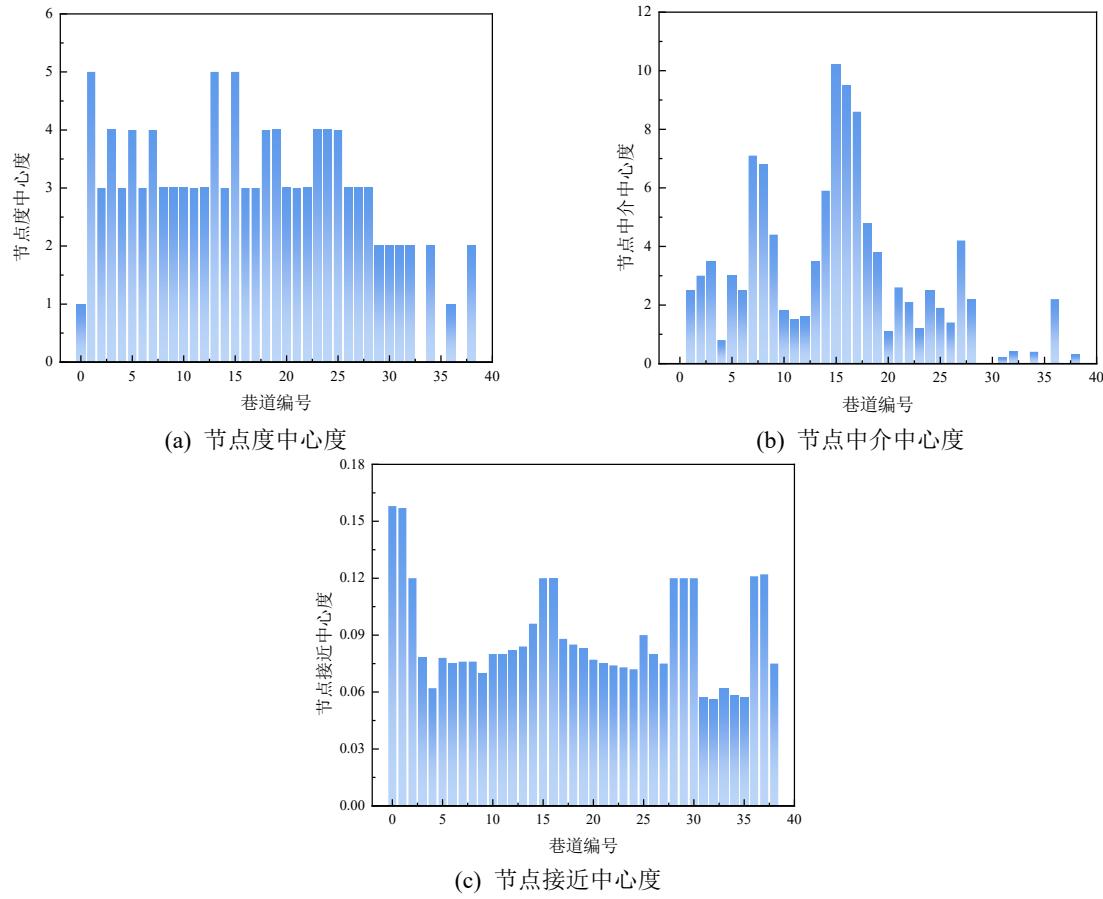


图 2 节点重要度

Fig. 2 Node importance

依据公式 (1) 以及各通风巷道始末节点的结构重要度值, 计算得到 71 采区 64 条重点通风巷道的结构重要度, 其结果如图 3 所示。

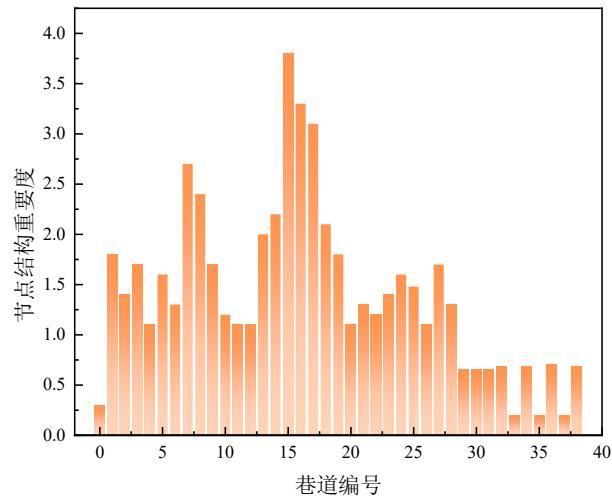


图 3 节点结构重要度

Fig. 3 Node structure importance

由图 3 可见, 71 采区通风网络联系紧密、结构复杂, 巷道的结构重要度整体水平较高。在此基

础上, 对 71 采区通风网络中 64 条承担风量输送的巷道逐一进行密闭模拟, 以确定其在整个通风系统中的功能重要度。采用 Ventsim 软件对正常工况下的风网进行模拟, 并与相应巷道密闭后重新分布的风网解算结果进行对比, 再依据公式(2)计算功能重要度。需要说明的是, 巷道 1 和巷道 64 分别为 540 进风立井和 540 回风立井, 其密闭将直接导致整个通风系统失效, 无法进行风量变化计算, 因此将其功能重要度标准化处理, 取值为 1。计算结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 71 采区通风系统的巷道功能重要度遵循以下规律: 进回风立井>回风巷>工作面>进风巷。71 采区采用“四进两回”混合式通风方式, 回风巷输送风量较大。当某一回风大巷密闭后, 另一回风大巷风量会显著增加, 但由于两回风大巷连通性较弱, 风流无法及时分流, 导致进风巷与工作面巷道风量发生明显扰动, 并在局部区域出现风流紊乱。因此, 回风巷的功能重要度仅次于进回风井。相较之下, 工作面巷道密闭对进回风井风量影响较小, 仅导致相关巷道风量下降及局部调整, 对整体通风网络的影响有限。值得注意的是, 巷道 30 为 71 采区辅运大巷, 承担主要风量输送, 密闭后会显著影响邻近的进风大巷与胶带大巷风量分布, 因此其功能重要度较高。其余进风巷道由于存在较多贯通巷与联络巷, 风量分担较为均衡, 密闭后对网络整体影响较小。巷道 30 (进风巷)、巷道 53 (工作面) 与巷道 27 (回风巷) 在密闭条件下的风量变化如图 5 所示。综上所述, 在巷道维护、风量监测、通风系统优化以及通风网络解算模型可靠性评估中, 可以巷道重要度为依据, 识别重点巷道, 从而提升工作效率和管理精度。

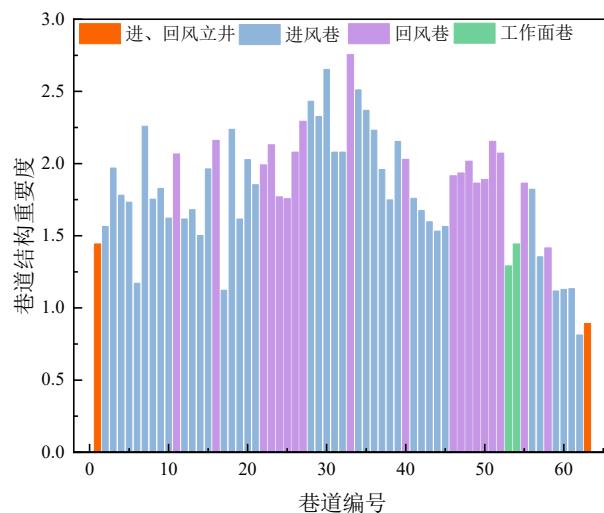


图 4 巷道结构重要度
Fig. 4 Importance of tunnel structure

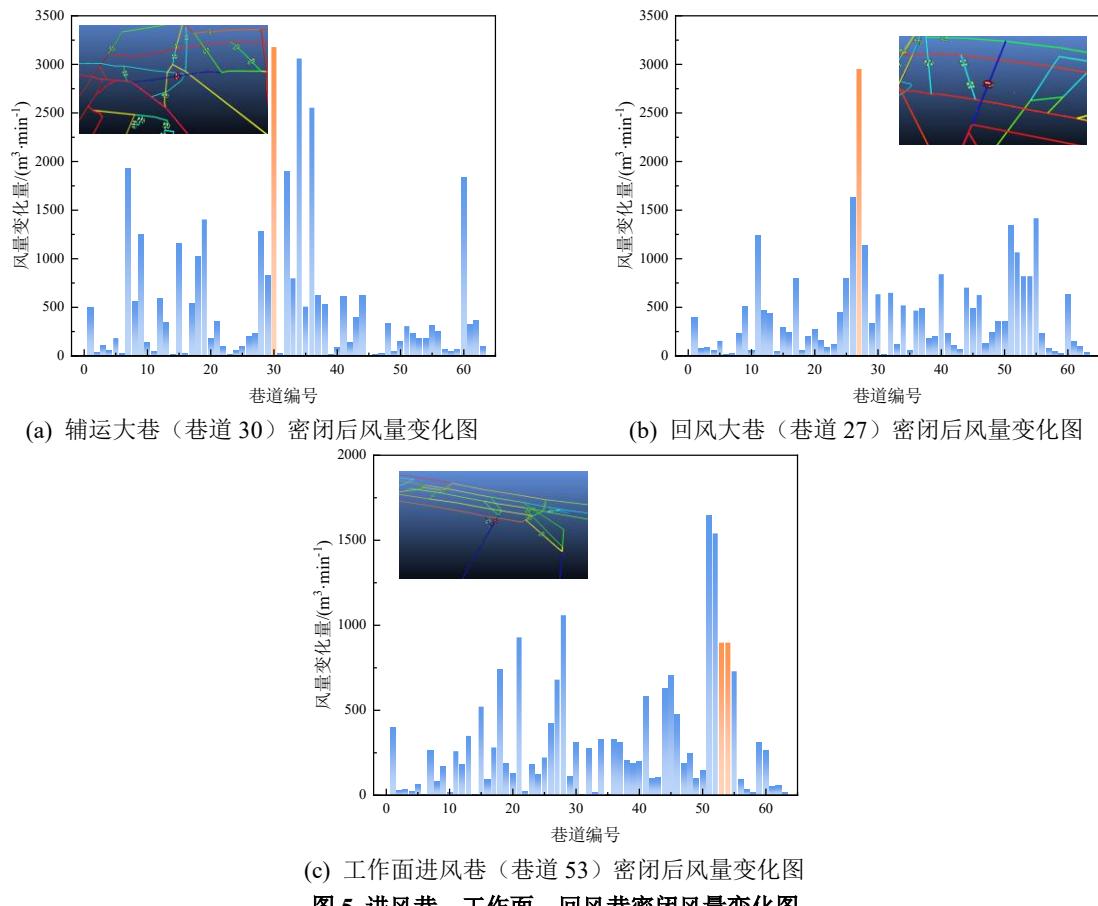


图 5 进风巷、工作面、回风巷密闭风量变化图

Fig. 5 Changes in the enclosed air volume of the air intake tunnel, working face, and return air tunnel

3 王庄煤矿通风网络解算模型准确性评估

依据王庄煤矿采掘工程平面图和阻力测定结果, 对矿井完成建模并进行通风模拟。王庄煤矿 Ventsim 通风模型如图 6 所示。

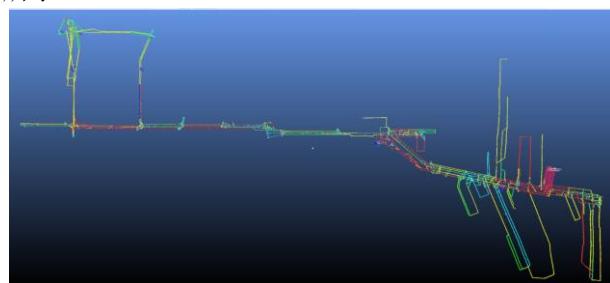


图 6 王庄煤矿 Ventsim 通风模型

Fig. 6 Ventsim ventilation model of Wangzhuang Coal Mine

3.1 评估方法

在通风网络解算模型建成后, 各巷道实际风量与模拟风量存在差异, 且误差对系统可靠性的影
响不同。基于 71 采区综合重要度确定巷道权重, 并结合相对误差, 可计算各巷道及整个系统的可靠
度。通过分析影响较大的巷道, 可进行局部调整以提升数值模型可靠性。计算公式如下所示:

(1) 巷道权重

巷道权重反映巷道在整个通风网络中的相对重要性。本文将巷道的结构重要度进行归一化处理,

并作为其在通风系统中的权重值, 其计算公式如下:

$$W_i = \frac{CI(i)}{\sum_{i=1}^n CI(i)} \quad (4)$$

式中, W_i 为第 i 个项在整体中的相对权重; $i = 1, 2, \dots, n$ 为巷道个数

(2) 巷道风量可靠度

巷道风量可靠度用于反映通风网络解算模型中各巷道模拟风量与实测风量之间的误差程度, 其计算公式如下:

$$\delta_i = \frac{Q_i_{\text{模拟}} - Q_i_{\text{实测}}}{Q_i_{\text{实测}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, δ_i 为第 i 个项的相对误差; $Q_i_{\text{模拟}}$ 为第 i 项的模拟值; $Q_i_{\text{实测}}$ 为第 i 个项的实测值。

(3) 模型可靠度

通风网络解算模型可靠度用于评价模型与实际矿井通风系统在考虑巷道权重后的吻合程度。其由各巷道的加权可靠度累加得到, 计算公式如下

$$R = \sum_{i=1}^n R(i) = \sum_{i=1}^n \delta_i W_i \quad (6)$$

式中, R 为模型可靠度。

3.2 评估结果

依据式 (4) 至式 (6), 计算得出王庄煤矿 71 矿区各巷道的权重值、风量相对误差及加权可靠度, 如图 7 所示。可以看出, 初始通风网络解算模型可靠度为 5.7%。针对加权可靠度较高的巷道, 通过调整摩擦阻力系数及通风设施风阻, 降低模型整体误差, 提高模型可靠性。修正后, 71 采区通风网络解算模型可靠度降低至 2.6%。

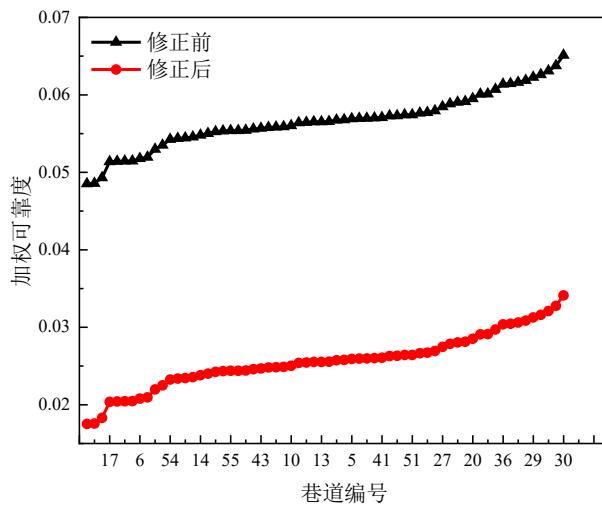


图 7 巷道加权可靠度

Fig. 7 Weighted reliability of roadway

图 8 显示了通风网络解算模型和实测巷道风量。可以看出, 矿井通风网络解算模型是以基点法阻力测定数据为基础支撑, 并使用节点压力法对实测数据进行误差处理后建模的仿真模型, 与矿井实际较为相符, 对模型中主要通风巷道进行可靠性评估, 能够保证模型宏观可靠性, 但模型中仍存

在部分未评估巷道风量与实际风量相差较大,对后续监测和通风系统优化产生一定影响。当基于巷道重要度对模型进行可靠性评估,并对加权可靠度较大巷道进行修正后,巷道风量的相对误差最大降低了10.2%,因此此种评估方式能够有效提高模型的可靠性。

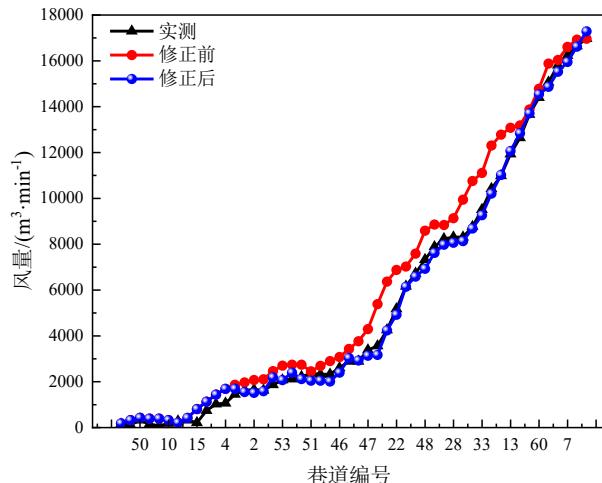


图8 通风网络解算模型和实测巷道风量

Fig. 8 Ventilation network solution model and measured tunnel air volume

4 结论

(1) 提出了一种基于巷道重要度的加权评估方法,该方法综合考虑了巷道在通风网络中的结构重要度与功能重要度,并将其作为权重引入模型可靠性计算。通过71采区实例分析,计算结果表明巷道综合重要度遵循进回风立井>回风巷>工作面>进风巷的规律。

(2) 基于巷道重要度对模型进行可靠性评估,并对加权可靠度较大巷道进行修正后,通风网络解算模型的可靠度由5.7%降至2.6%,证明了该方法在提升模型拟合度和实时适应性方面的优势。

(3) 与传统通风模型准确性评估方法相比,本研究提出的加权评估方法能够更全面地反映各巷道误差对整体系统可靠性的影响,为高瓦斯复杂矿井的智能通风建设、重点巷道识别及动态维护提供了科学依据和工程应用价值。

参考文献

- [1] 王思洁. 动态管理模型监测技术在通风系统中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2020, (07): 195-197.
- [2] 王帅. 新源煤矿矿井风量和通风能力核定研究[J]. 能源技术与管理, 2023, 48(02): 28-30.
- [3] 王向如. 高瓦斯矿井通风技术研究[J]. 能源与节能, 2024, (12): 105-107+111.
- [4] 刘通海. 基于灰色综合评价模型的矿井通风系统可靠性评价[J]. 能源与节能, 2021, (01): 195-197.
- [5] 刘洋. AHP在煤矿通风系统安全评价中的应用[J]. 煤矿现代化, 2018, (01): 110-112.
- [6] 吴奉亮, 寇露. 用于矿井通风网络解算的通风机风压性能曲线自动识别方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50(04): 103-111.
- [7] 韩文鑫. 基于CiteSpace的矿井通风文献综述[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(02): 135-141.
- [8] 王伟, 吴兵, 黄来胜, 等. 基于拓扑结构和级联失效的巷道重要度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(05): 990-999.
- [9] 王海峰, 李继红. 基于Ventsim的矿井通风系统优化研究[J]. 甘肃科技, 2025, 41(01): 43-46.
- [10] 祝兴平, 杜平, 高睿. 通风安全动态分析系统研究[J]. 微计算机信息, 2008, 11: 11-12.
- [11] 郭建伟, 陈开岩, 司俊鸿, 等. 复杂通风网络角联风流安全稳定性评价与控制[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(5): 35-38.

[12] 付凯, 夏靖波, 赵小欢. 动态融合复杂网络节点重要度评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(10): 112-119.

¹ **第1作者简介:** 刘军伟 (1987-), 男, 本科学历, 工程师, 研究方向: 矿井通风与安全。 E-mail: liujw1987hpu@126.com。

***通讯作者简介:** 陈家豪 (2001-), 男, 硕士在读, 中国矿业大学 (北京), 研究方向: 矿井通风与安全。 E-mail: ZQT2310102028@cumtb.edu.cn