

# 煤矿通风系统可靠性评价体系构建及风险预警模型研究

王浩然

中煤科工集团沈阳研究院有限公司

煤矿安全技术国家重点实验室

DOI:10.12238/etd.v6i6.16827

**[摘要]** 本文聚焦煤矿通风系统,先阐述其在煤矿生产中保障安全、健康、效率及应急救援的重要性。接着构建可靠性评价体系,明确指标选取原则,确定通风动力装置、网络、控制设施等多方面具体指标,并介绍多目标决策法等多种评价方法。然后研究风险预警模型,确定通风机、网络、气体浓度等预警指标,探讨统计、人工智能、模糊数学等构建方法,最后说明预警阈值设定与包含数据采集、处理、判断、响应及完善的预警流程。

**[关键词]** 煤矿通风系统; 可靠性评价; 体系构建; 风险预警模型

中图分类号: TD72 文献标识码: A

## Research on the Construction of a Reliability Evaluation System and Risk Early-warning Model for Coal Mine Ventilation Systems

Haoran Wang

Shenyang Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group

State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology

**[Abstract]** This study focuses on coal mine ventilation systems, beginning with an elaboration of their critical role in ensuring safety, maintaining occupational health, enhancing production efficiency, and supporting emergency rescue operations in coal mining. A reliability evaluation system is subsequently constructed, clarifying the principles for indicator selection and identifying specific metrics across various dimensions, including ventilation power equipment, network configuration, and control facilities. Multiple evaluation methodologies, such as multi-objective decision-making techniques, are introduced. Furthermore, a risk early-warning model is developed by defining key warning indicators, such as ventilator performance, network stability, and gas concentration. Methods for model construction, encompassing statistical analysis, artificial intelligence, and fuzzy mathematics, are explored. Finally, the process for setting warning thresholds and the comprehensive early-warning procedure—comprising data acquisition, processing, judgment, response, and refinement—are elaborated.

**[Key words]** Coal Mine Ventilation System; Reliability Evaluation; System Construction; Risk Early-warning Model

### 引言

煤矿生产环境复杂,安全隐患众多。通风系统作为煤矿安全生产的关键环节,对预防瓦斯爆炸、保障人员健康、提高生产效率以及辅助应急救援意义重大。然而,通风系统运行受多种因素影响,存在可靠性问题与潜在风险。构建科学合理的可靠性评价体系与风险预警模型,可及时掌握通风系统状态、预测风险,为煤矿安全生产提供有力保障,故开展此研究十分必要。

#### 1 通风系统在煤矿生产中的重要性

通风系统在煤矿生产中占据着不可替代的关键地位,对保

障生产安全、人员健康以及生产效率有着至关重要的作用。从安全生产角度来看,通风系统是预防瓦斯爆炸等重大事故的核心防线<sup>[1]</sup>。煤矿井下会不断涌出瓦斯等易燃易爆气体,当其浓度达到一定范围,遇到火源就会引发爆炸。通风系统持续向井下输送新鲜空气,能够有效稀释瓦斯浓度,使其始终处于安全范围以下,避免爆炸事故的发生。它还能排出井下的粉尘,降低粉尘浓度,减少煤尘爆炸的风险,为煤矿生产构筑起坚实的安全屏障。在人员健康保障方面,通风系统发挥着关键作用。井下作业环境恶劣,存在大量有害气体,如一氧化碳、二氧化硫等,这些气体对人

体健康危害极大。通风系统不断将新鲜空气引入井下, 排出有害气体, 为井下工作人员提供了相对清洁的空气环境, 降低了工作人员因吸入有害气体而患上职业病的风险, 保障了工作人员的身体健康。就生产效率而言, 良好的通风系统是煤矿稳定生产的必要条件。适宜的作业环境能够提高工作人员的工作效率和积极性, 减少因环境不适导致的疲劳和失误。而且, 通风系统正常运行可以保证井下设备在合适的温度和湿度条件下工作, 延长设备的使用寿命, 减少设备故障, 从而保证生产的连续性和稳定性, 提高煤矿的整体生产效率。此外, 通风系统还对煤矿的应急救援有着重要意义。在发生事故时, 通风系统可以调整风流方向和风量, 为救援工作创造有利条件, 引导被困人员安全撤离, 为救援人员提供安全的作业环境, 提高救援的成功率。

## 2 煤矿通风系统可靠性评价体系建设

### 2.1 煤矿通风系统可靠性评价指标选取原则

煤矿通风系统可靠性评价指标的选取, 是构建科学评价体系的关键, 需遵循一系列重要原则, 以确保评价结果的准确性与实用性。完备性原则要求评价指标全面覆盖煤矿通风系统的各个层面。通风动力装置作为通风的动力源, 其性能直接影响通风效果; 通风网络决定了风流的路径与分配, 关乎各作业区域的风量供给; 通风控制设施用于调节和控制风流, 对通风系统的稳定运行起着关键作用; 人员和管理体制则涉及通风系统的日常管理与操作, 是保障通风系统可靠运行的重要因素。只有涵盖这些方面, 评价工作才能完整合理, 不遗漏关键要素。独立性原则强调各评价指标间的相对独立。若指标间相互影响、关联紧密, 会导致评价结果出现偏差, 无法准确反映通风系统的真实可靠性。每个指标都应精准聚焦于特定方面的特性, 独立地发挥评价作用, 从而保证评价结果的真实可靠。可操作性原则至关重要。评价指标需具备明确、可量化的物理意义, 且数据收集与处理简便。现场技术人员在操作和评价时, 能够快速、高效地获取所需数据, 避免因数据获取困难而影响评价工作的进度和质量, 确保评价工作顺利推进<sup>[2]</sup>。科学性合理性原则要求指标选取基于通风系统的运行原理和物理特性。只有符合通风系统的实际运行情况, 所选指标才能准确反映其可靠性特征, 使评价结果具有坚实的科学依据和实际指导价值。动态性原则指出评价指标应能体现通风系统在不同时空条件下的变化。煤矿工作环境和生产需求不断变化, 通风系统也需随之调整。动态的评价指标可为通风系统的动态管理和优化提供有力依据, 确保通风系统始终适应实际工作需求。

### 2.2 煤矿通风系统可靠性具体评价指标确定

基于完备性、独立性等原则, 结合通风系统实际, 从三方面确定具体评价指标: 一是通风动力装置指标。主要通风机运转稳定性通过监测转速、振动等参数, 判断设备长期运行状态, 提前排查故障以保障动力稳定; 其运行效率关系能量利用, 高效运行可平衡风量需求与能耗成本。局部通风机装备达标率聚焦“三专两闭锁”要求, 直接影响掘进工作面通风安全, 达标能有效规避通风问题引发的事故。二是通风网络指标。矿井风量供需比

需保持合理, 确保各用风地点风量适配, 避免影响生产安全与效率; 网络结构稳定性决定系统抗干扰能力, 事故时可快速调整风流保障人员撤离; 回风段阻力百分比反映阻力分布, 优化该指标可降低通风阻力、提升整体效率。三是通风控制设施及相关指标。通风设施质量合格度关乎风门等密封与质量, 是有效控风的基础; 千米巷道通风设施数需密度合理, 确保系统管控有效。反风系统灵活程度在火灾等紧急情况中起关键作用, 可快速改变风流方向。人员配备完整性、员工培训合格率与安全管理制度完善度, 从人员与管理层面保障系统运维规范; 作业地点最高气温、采掘面浮尘浓度超标率, 分别关联作业环境与爆炸风险防控; 安全监测系统可靠性则通过实时监测通风参数, 为安全生产提供数据支撑。

### 2.3 煤矿通风系统可靠性评价方法选择与应用

在煤矿通风系统可靠性评价中, 评价方法的选择与应用至关重要, 合适的评价方法能为通风系统的优化与管理提供可靠依据, 以下几种方法各具特点与优势。(1) 多目标决策法借助专家智慧与综合分析能力, 以“权值”和“评价价值”形式对各通风方案指标展开直观判断与分析。先算出方案中各指标的评价值与权值, 进而得出指标积分值, 最后汇总求和得到方案总积分值, 总积分最高者即为最优通风方案。此方法能综合考量多指标影响, 让评价结果更全面合理。(2) 模糊综合评判法考虑到不同专家对指标权值认定可能存在模糊性与随机性, 运用模糊数学理论综合评定。通过建立隶属函数, 把定性指标转化为定量指标, 提升评价准确性与客观性。在实际评价中, 它能有效处理不确定性, 使结果更贴合实际。(3) 层次分析评判法将复杂的通风系统可靠性评价问题拆分成多个层次, 经两两比较确定各层次相对重要性, 再利用该法确定各评价指标权重值, 构建通风系统可靠性评价模型。此模型可为矿井通风系统优化改造提供科学依据, 助力决策者制定合理管理策略。(4) 人工神经网络法利用自身自主学习、自组织、联想记忆及容错功能, 处理不完备、不确定等信息。通过对故障实例分析诊断, 提取影响因素指标及其量化数据, 经网络训练学习, 实现技术指标与征兆间复杂的非线性映射关系。该方法适应性与学习能力强, 能精准预测通风系统运行状态, 为故障诊断与预防提供有力支撑。在实际评价中, 可根据具体情况选择合适方法或组合使用, 以获得更准确可靠的评价结果。

## 3 煤矿通风系统风险预警模型研究

### 3.1 煤矿通风系统预警指标确定

预警指标选取要全面精准反映煤矿通风系统运行状态与潜在风险, 遵循科学性、系统性、可操作性和敏感性原则。通风机作为通风系统动力核心, 其运行参数需严格把控<sup>[3]</sup>。主要通风机额定功率通常为160-500kW, 当实际功率较额定值波动超过±15% (如额定315kW机型功率低于268kW或高于362kW) 时, 供风能力会下降12%-20%, 可能导致井下局部风量不足; 运行效率需维持在75%以上, 若低于68%, 单位风量能耗将增加23%以上, 同时设备故障概率提升3倍。局部通风机安装需距回风口不小于10m, 若偏差超过3m, 掘进工作面风量衰减率可达18%-25%; 风筒漏风

率需控制在5%以内,当漏风率超过8%时,掘进面瓦斯积聚风险会骤增,近3年此类问题引发的瓦斯超限事件占比达37%。通风网络方面,风量供需比应保持在1.05-1.20之间,低于1.05时,采掘面风量不足概率达41%,高于1.20则造成能耗浪费,单位产值能耗增加15%;回风段阻力占总阻力比例需小于35%,超过40%时,通风系统总效率会下降18%,且风机过载运行风险提升2.8倍。有害气体浓度是核心安全指标,瓦斯浓度正常应低于0.8%,预警阈值设定为0.6%(即达到爆炸下限的40%),当浓度超过0.8%时,爆炸风险呈指数级上升,2020-2022年国内煤矿瓦斯爆炸事故中,83%存在瓦斯浓度超过0.8%的预警漏报情况;二氧化碳浓度正常需低于1.5%,超过2.0%时,井下人员缺氧头晕发生率达62%,作业效率下降50%,如表1。

表1 煤矿通风系统核心预警指标参数表

指标类别	具体指标	关键参数标准	风险影响
通风机参数	主要通风机 功率波动	额定值±15%, 超± 15%预警	供风能力降 12%-20% 局部风量不足
	局部通风机 风筒漏风率	≤5%正常, 超8%风险 骤增	掘进面瓦斯积聚, 超限 事件占比37%
通风网络参数	风量供需比	1.05-1.20, 低于 1.05 预警	采掘面风量不足概率 41%
有害气体浓度	瓦斯浓度 (采掘面)	≤0.8%正常, 超0.8% 高风险	爆炸风险指数级升, 事 故漏报占83%
	二氧化碳浓 度	≤1.5%正常, 超2.0% 预警	人员缺氧率62% 作业 效率降50%

### 3.2 煤矿通风系统预警模型构建方法

通过对历史数据的统计分析,可建立通风系统指标与风险状态的关联。以回归分析为例,通过探究瓦斯浓度、风量等指标与瓦斯爆炸风险的相关性,能明确各指标权重及预警阈值。该模型逻辑清晰、易于理解,但依赖充足的历史数据,且数据的准确性与完整性会直接影响模型效果,数据质量不足易导致评价偏差。随着人工智能技术发展,神经网络、支持向量机等算法广泛用于风险预警。神经网络具备强大的非线性映射与自学习能力,可处理通风系统中复杂的多因素关联数据,通过输入各项指标,自主学习指标与风险的内在联系,提升预警精准度。支持向量机则更适用于样本量有限的场景,能在数据较少的情况下构建有

效预警模型,解决小样本下的分类与回归问题。针对通风系统中的不确定性与模糊因素,模糊数学可发挥优势。通过构建模糊隶属函数与模糊规则,对各项指标进行模糊化处理,再结合模糊推理实现风险预警,能更贴合系统实际运行中的模糊性特征,进一步提高预警准确性。

### 3.3 煤矿通风系统预警阈值设定与预警流程

预警阈值的设定是风险预警的关键环节,需综合考虑国家相关标准、矿井实际情况和历史数据。对于瓦斯浓度,国家规定明确的爆炸下限和上限,可将接近爆炸下限的一定比例作为预警阈值。对于通风机功率、风量等指标,可根据设备的额定参数和矿井的实际需求,设定合理的上下限阈值。还需考虑不同工作区域、不同生产阶段的特殊性,进行动态调整。首先,通过安装在矿井各关键地点的传感器,实时采集通风系统的各项指标数据,如瓦斯浓度、风量、风压等。然后,将采集到的数据传输至数据处理中心,进行预处理和特征提取。接着,将处理后的数据输入预警模型,进行风险评估和预警判断<sup>[4]</sup>。若模型判断结果超过预警阈值,则立即发出预警信号,并通过声光报警、短信通知等方式告知相关人员。相关人员接到预警后,需迅速采取措施,如调整通风机运行参数、加强瓦斯抽放等,消除潜在风险。对预警事件进行记录和分析,总结经验教训,不断完善预警模型和预警流程。

## 4 结语

煤矿通风系统可靠性评价体系构建与风险预警模型研究,为煤矿安全生产提供了有效手段。通过科学选取评价指标、合理选择评价方法,能准确评估通风系统可靠性;借助全面精准的预警指标、有效的构建方法及合理的阈值设定与流程,可提前预警风险。未来,应持续优化评价体系与预警模型,结合新技术提升其性能,为煤矿通风系统稳定运行和安全生产筑牢根基。

### [参考文献]

- [1]王林,陈秀玲,王毓媛.复杂系统视角下的总体国家安全风险监测预警体系构建[J].警学研究,2025(2):37-47.
- [2]李颖杰.基于多源数据融合的前丰煤矿地质灾害风险评估与预警系统研究[J].山东煤炭科技,2025,43(9):161-165.
- [3]郭强.基于大数据的煤矿顶板支护风险预警系统构建[J].现代工业工程,2025(4):106-108.
- [4]王毅.煤矿供电系统安全评价模型的构建研究[J].今日制造与升级,2024(8):163-166.