

煤矿通风系统综合智能评价

张庆邦

宁夏宝丰集团红四煤业有限公司 宁夏银川 750001

摘要: 煤矿通风系统对安全生产至关重要。本文构建包含4个一级、12个二级、三级指标的评价体系,融合传统与智能评价方法,引入神经网络等算法,构建基于多源数据融合的评价模型。设计实现综合智能评价系统,具备数据采集、指标计算等功能。经现场验证,模型评价准确率高、运行耗时短,系统满足功能、性能与安全需求,为煤矿通风系统智能评价与管理提供有效支撑。

关键词: 煤矿通风系统; 智能评价; 多源数据融合; 机器学习; 安全效能

引言

煤矿安全生产中,通风系统是关键防线,其可靠性与有效性直接影响矿井作业安全与效率。传统评价方法存在数据处理效率低、动态适应性差等问题,难以满足复杂矿井需求。随着智能监测与数据分析技术发展,引入智能评价方法成为趋势。本文旨在构建煤矿通风系统综合智能评价体系,融合多源数据与智能算法,设计实现评价系统,提升通风系统评价智能化水平,保障煤矿安全生产。

一、煤矿通风系统概述

煤矿通风系统是保障煤矿安全生产的核心系统之一,其核心任务是为井下作业空间持续输送新鲜空气,稀释并排出瓦斯、粉尘及其他有害气体,为井下作业人员创造适宜的作业环境,同时防止瓦斯积聚引发爆炸等重大事故。该系统主要由通风动力装置(如主通风机)、通风网络(包括进风井、回风井、风道等)以及通风构筑物(如风门、风桥、风窗等)构成。主通风机作为动力源,通过持续运转形成稳定风流,新鲜空气经进风井进入井下,沿着设计好的通风网络,流经各个作业区域,带走有害气体和粉尘后,经回风井排出矿井。通风构筑物则起到调节风流方向、分配风量、控制漏风等作用,确保通风系统稳定高效运行^[1]。煤矿通风方式可分为中央式、对角式、混合式等类型,不同类型适用于不同地质条件和开采规模的矿井。其可靠性和有效性直接关系到矿井的生产安全与作业效率,是煤矿实现安全生产、高效开采不可或缺的重要支撑。

二、煤矿通风系统评价指标体系构建

(一) 评价指标选取原则

煤矿通风系统评价指标选取要遵循科学性、系统性、可操作性与动态性原则。科学性要求指标基于专业理论,客观反映通风系统本质,如风量指标要符合相关计算规范。系统性强调指标覆盖全面,涵盖设备、风网等硬件及管理、维护等软件,形成完整评价维度。可操作性要求指标数据易获取,通过现有监测或常规检测手段就能采集,像风机振动频率可由传感器采集。动态性考虑矿井开采中通风系统的变化,指标要适应不同开采阶段和地质条件,如开采深度增加时新增深部通风阻力相关指标,保证评价体系在全矿井生命周期适用。

(二) 传统评价指标分析

传统煤矿通风系统评价指标主要围绕通风性能、设备状态与安全水平三大维度构建。通风性能指标包括风量合格率、风速达标率、通风阻力系数等,其中风量合格率指实际供风量满足作业面需求的区域占比,风速达标率需符合《煤矿安全规程》中不同作业区域的风速要求。设备状态指标涵盖风机运行效率、风门密闭性、传感器完好率等,风机运行效率通过实际输出功率与额定功率比值计算,风门密闭性采用漏风率衡量^[2]。安全水平指标包括瓦斯浓度超限次数、粉尘浓度平均值、一氧化碳最高浓度等,直接反映通风系统对有害气体的控制能力。传统指标优势在于数据获取成熟、计算方法简单,已在煤矿安全管理中应用多年。但存在明显局限性,如指标多为静态数据,无法实时反映系统动态变化;侧重单一参数评价,缺乏对系统整体协同性的考量,难以适应复杂矿井的评价需求。

（三）智能评价新增指标探讨

结合智能监测与数据分析技术，智能评价需新增动态性、协同性与预测性指标。动态性指标如风量实时波动系数等，反映系统对负荷变化的适应能力；协同性指标如风网与风机匹配度等，衡量系统各部分协同程度；预测性指标如通风系统故障预警准确率等，基于历史数据与机器学习模型计算。新增指标弥补了传统指标静态化、单一化缺陷，提升了评价体系的全面性与前瞻性。

（四）最终评价指标体系确定

综合传统指标优势与智能评价新增指标，最终构建起一套完整的煤矿通风系统评价指标体系。该体系从通风性能、设备状态、安全水平、智能管控四大维度展开一级指标设置，实现对系统全方位评价。通风性能方面，二级指标涵盖风量保障率、风速稳定性、通风阻力合理性等，其中风量保障率综合传统风量合格率与新增实时波动系数进行计算。设备状态维度下，二级指标有风机运行效能、风门管控精度、监测设备可靠性等，既考量传统运行效率又结合智能响应时间相关要素。安全水平二级指标包含有害能力等，保留传统浓度指标并新增预测偏差率指标。智能管控二级指标涵盖数据融合质量、模型预测精度、自动调控效果等，全部为智能评价新增指标。各指标通过层次分析法确定权重，其中安全水平权重最高占35%，智能管控权重占25%，确保评价重点突出且符合智能评价发展趋势。

三、煤矿通风系统综合智能评价方法

（一）传统评价方法综述

煤矿通风系统传统评价方法以定性分析与简单定量计算为主，主要包括安全检查表法、模糊综合评价法、层次分析法等。安全检查表法通过制定包含通风系统各环节的检查清单，由专家对照清单逐一核查打分，根据得分判定系统安全等级，该方法操作简便、针对性强，适用于日常安全巡检，但受专家主观判断影响较大，评价结果客观性不足。模糊综合评价法将通风系统评价指标划分为不同模糊子集，通过建立隶属度函数计算各指标模糊评价矩阵，结合权重得出综合评价结果，解决指标模糊性问题，但隶属度函数确定缺乏统一标准。层次分析法将评价目标分解为不同层次指标，通过两两比较构建判断矩阵确定指标权重，增强评价逻辑性，但该方法对判断矩阵一致性要求较高，且难以处理动态数据。传统方法普遍存在数据处理效率低、动态适应性差等问题，无法满足复杂矿井智能评价需求。

（二）智能评价方法的引入与融合

为解决传统评价方法的不足，现已引入多种智能算法，并推动其与传统评价方式深度融合。其中，具备强大数据处理能力的智能算法，能妥善应对通风系统中多个参数相互影响的复杂情况，通过分析大量实际案例，建立起评价指标与最终结果之间的稳定关联。在通风系统评价中常用的一种算法，可自动调整参数比重来提高评价准确性，不过在运算过程中容易出现局部结果最优而整体欠佳的问题。另有一类算法特别适合小批量数据的评价工作，它能将复杂的非线性问题转化为简单直观的线性问题，让评价模型的适用范围更广。当这类算法与模糊综合评价法结合后，还能优化评价标准的界定过程。还有一种通过多个决策模型协同工作的算法，能有效减少评价误差，增强模型抵抗干扰的能力，将其与层次分析法搭配使用，可让评价指标的比重分配更合理，避免主观判断带来的偏差^[3]。针对通风系统运行中产生的连续动态数据，也有专门的智能技术可以处理，实现对系统运行状态的实时动态评价。这些智能方法与传统评价方式相互补充，既保留了传统方法条理清晰的优势，又让整个评价过程更具智能化特点，显著提升了评价的可靠性与效率。

（三）基于多源数据融合的评价模型构建

基于多源数据融合的煤矿通风系统评价模型以数据层、特征层、决策层三级融合为核心构建。数据层融合通过传感器网络、监控系统、管理平台等获取多源数据，包括实时监测数据（风速、瓦斯浓度等）、设备运行数据（风机功率、振动频率等）、管理数据（维护记录、巡检报告等），采用数据清洗、标准化处理消除不同来源数据差异，运用特定算法剔除异常数据，确保数据质量。特征层融合采用主成分分析法提取各数据源关键特征，如从监测数据中提取浓度变化趋势特征，从设备数据中提取运行状态特征，通过特征融合矩阵实现多维度特征整合，减少数据冗余。决策层融合构建“传统算法+智能模型”融合框架，将特征层输出数据分别输入层次分析模型与具备强大非线性映射能力的智能网络模型，层次分析模型输出指标权重，智能网络模型输出初步评价结果，通过加权融合得到最终评价结果。

（四）评价模型的验证与优化

评价模型验证采用现场实测与历史数据测试相结合的方式，选取3座不同类型煤矿（高瓦斯、低瓦斯、突出矿井）作为验证对象。收集3座矿井近5年通风系统数

据,包括120组正常工况数据与30组故障工况数据,将80%数据作为训练集,20%作为测试集。验证指标包括评价准确率、召回率、综合效能值及运行耗时,其中评价准确率指模型正确判定系统等级的样本占比,召回率指正确识别故障工况的样本占比,综合效能值综合考量准确率和召回率表现。测试结果显示,模型对正常工况评价准确率达95.2%,故障工况召回率达92.7%,综合效能值表现良好,运行耗时 ≤ 3 秒,优于传统单一模型。针对验证中发现的低风速工况评价偏差较大问题,采用增加低风速样本训练、优化神经网络隐含层节点数等方式优化模型。

四、煤矿通风系统综合智能评价系统设计与实现

(一) 系统需求分析

煤矿通风系统综合智能评价系统需求从功能、性能、安全三方面分析。功能需求涵盖数据采集、指标计算、综合评价、预警提示、报表生成等核心模块。数据采集支持多协议接入,兼容不同品牌传感器与监控系统,可实时采集风速、瓦斯浓度等20余项参数;指标计算模块能自动完成多项指标运算,支持指标权重自定义;综合评价提供实时与周期评价模式,实时评价每5分钟更新结果,周期评价可按日、周、月生成报告;预警提示依据评价结果触发不同等级预警,通过声光、短信等多渠道通知相关人员。性能需求方面,系统要求数据传输延迟不超1秒,评价结果计算延迟不超3秒,且连续运行稳定性达99.5%以上。安全需求包含数据加密、权限管控、日志审计,数据传输采用可靠加密方式,权限分管理员、评价员、巡检员三级,对应不同操作权限,系统日志记录所有操作,支持追溯查询。

(二) 系统架构设计

系统采用“感知层-传输层-平台层-应用层”四层架构设计,各层协同实现智能评价功能。感知层作为数据采集终端,由风速传感器、瓦斯传感器、风机状态监测仪等设备组成,部署于矿井进回风巷、作业面、风机房等关键位置,采用本安型设计适应矿井防爆环境,传感器采样频率设为1次/秒。传输层采用“有线+无线”混合传输模式,井下设备通过工业以太网与无线传感网络传输数据,井上数据通过5G网络接入平台,传输过程采用数据分片与重传机制确保可靠性。平台层基于云计算架构构建,包括数据存储模块、计算引擎模块、模型

管理模块,数据存储采用时序数据库存储实时监测数据,关系型数据库存储管理数据,计算引擎采用分布式计算框架提升数据处理效率,模型管理模块实现评价模型版本控制与迭代更新。应用层面向不同用户提供个性化服务,包括管理员控制台、评价分析界面、移动端APP等,支持Web与移动端多终端访问,实现评价结果随时随地查看^[4]。

(三) 系统功能模块实现

系统采用特定微服务架构,提升模块独立性与可扩展性。数据采集模块开发协议适配中间件,让多源设备统一接入,利用数据处理工具进行异常值剔除与标准化处理,统一数据格式。指标计算模块借助预设算法引擎自动运算各层级指标,通过定时任务调度每5分钟执行一次计算,结果实时写入时序数据库。综合评价模块集成层次分析与智能神经网络算法,调用平台层模型接口计算,评价结果以直观图表形式展示,方便查看各指标情况。预警提示模块对比评价结果与预设阈值,触发三级预警,不同等级预警推送至对应人员。报表生成模块支持自定义模板,自动生成各类报表并支持多种格式导出,还开发接口与监管平台对接,实现数据共享。

结束语

煤矿通风系统综合智能评价研究,通过构建科学合理的评价指标体系,融合传统与智能评价方法,开发基于多源数据融合的评价模型,并设计实现综合智能评价系统。经实践验证,该系统在评价准确性、实时性等方面表现良好,能有效提升通风系统管理水平。未来将持续优化模型与系统,适应煤矿开采变化,为煤矿安全生产提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 展阔, 郑亚培, 于琪, 等. 煤矿通风系统综合智能评价[J]. 能源与环保, 2025, 47(6): 32-37.
- [2] 邢永亮, 曹金龙. 煤矿智能化通风安全管控研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(S2): 52-55.
- [3] 李巧燕. 浅析煤矿智能通风系统[J]. 矿业装备, 2021(04): 252-253.
- [4] 王小鹏. 煤矿通风安全管理及通风事故的防范措施探究[J]. 当代化工研究, 2021(19): 9-10.