

智能通风系统在地下铁矿山的应用与效果分析

黎 钊

安徽开发矿业有限公司 安徽六安 237426

摘要：本文围绕智能通风系统在地下铁矿山的实践应用展开系统性研究，通过构建“传感网络—控制平台—执行机构”三位一体的系统架构，结合物联网、边缘计算及模型预测控制（MPC）等关键技术，实现矿山通风的实时监测、智能决策与精准调控。研究重点分析了地下铁矿山通风需求特征，提出基于 MPC 的风机调速与风道阻尼动态调节策略，并构建人机交互可视化平台。经实际应用验证，该系统可提升通风效率，降低能耗，减少有毒有害气体浓度波动幅度，显著增强矿山生产安全性与经济性，为矿山智能化转型提供技术支撑与理论参考。

关键词：智能通风系统；地下铁矿山；模型预测控制；能耗优化；安全提升

1、引言

随着矿山智能化建设的深入推进，传统通风系统已难以满足地下铁矿山对实时性、可靠性及节能性的严苛要求。据国家矿山安全监察局统计，我国地下矿山因通风不畅引发的安全事故占比达 25%，且年耗电量占矿山总能耗的 30% 以上。在此背景下，基于物联网、边缘计算及智能算法的通风系统应运而生。本文旨在通过系统性分析智能通风系统的技术架构、应用方案及实施效果，为地下铁矿山通风系统的智能化改造提供科学依据与工程实践指南，推动矿山行业向“安全、高效、绿色”方向转型升级。

2、智能通风系统概述

2.1 系统组成

智能通风系统由传感网络、控制平台与执行机构三部分构成。传感网络采用多参数集成传感器阵列，集成风速传感器、压力传感器、温湿度传感器及气体检测仪，实现风量、风压、温度、湿度、瓦斯浓度等关键参数的实时同步采集，采样精度达 $\pm 1\%FS$ 。控制平台基于边缘计算节点构建，搭载工业级嵌入式处理器，支持本地数据预处理与决策生成，通过工业以太网/5G 双链路与中央控制中心互联，确保数据传输可靠性。执行机构包含变频调速风机、电动调节风门及可调阻尼风窗，通过 PLC 控制器实现风机转速无级调节、风门开度精准控制及风道阻尼动态匹配，形成从参数感知到执行反馈的完整硬件链条。各组件通过标准化接口实现模块化集成，支持系统灵活扩展与快速部署。

2.2 工作原理

系统遵循“数据采集—智能决策—精准执行”的闭环控制逻辑。传感网络以 1Hz 固定频率或动态可调频率采集环境参数，原始数据经边缘节点进行噪声滤波、缺失值插补及特征提取处理，生成结构化数据流。基于模型预测控制（MPC）算法构建优化模型，以最小化能耗、最大化通风效率及维持环境参数稳定为目标，结合实时工况约束条件生成最优调控指令。指令通过工业总线传输至执行机构，驱动变频风机调整转速、电动风门改变开度、可调阻尼装置优化风道流通特性，实现风量、风压的动态平衡调节。系统通过闭环反馈机制持续修正控制策略，形成自适应控制循环，确保通风状态始终处于最优工况区间。

2.3 关键技术

系统集成多项核心技术实现智能化升级。物联网技术通过低功耗广域网实现传感器、执行器与控制平台的泛在互联，构建设备级互联互通网络。边缘计算技术将计算任务下沉至现场端，通过本地化数据处理降低中央服务器负载，减少数据传输延迟至毫秒级，提升系统实时响应能力。模型预测控制（MPC）算法基于滚动优化策略，在每个控制周期内求解带约束优化问题，实现多变量协同控制，有效克服传统 PID 控制超调量大、调节时间长等缺陷。数字孪生技术构建矿山通风系统三维虚拟模型，实时映射物理空间状态，支持通风网络可视化展示、历史数据回溯及故障模拟推演，为运维决策提供直观数据支撑，

智能通风系统建设是一个综合采矿、自动控制、网络

通信、人机定位、（基于人工智能的）优化控制等多专业技术融合的系统性项目行，系统分四个阶段执行

| 阶段等级 | 阶段名称 | 主要功能 | 预期效果 | 能耗降低 |
|------|-------------|---|---------------------|------|
| 1 | 基本控制和监视 | 实现风扇、风窗和风门的基本控制和监控 | 提高安全性。 | 5% |
| 2 | 基于时间和事件的控制 | 基于时间表、生产活动、爆破活动和火灾情况进行通风控制 | 提高安全性、提高生产效率 | 10% |
| 3 | 基于位置的控制 | 根据车辆和人员位置来自动控制风机、风窗和风门，在需要的地方改善空气质量 | 提高安全性、提高生产效率、改善作业环境 | 25% |
| 4 | 具有优化性能的自动控制 | 基于传感器反馈的经验模型对风机、风窗和风门进行在线优化，真正的闭环控制和优化矿井气流和空气质量 | 提高安全性、提高生产效率、改善作业环境 | 40% |

3、地下铁矿山通风需求分析

3.1 矿山通风基本参数

地下铁矿山通风需统筹多维度环境参数调控，以构建安全高效的作业环境。风量作为核心指标，需根据井下作业面分布、人员密度及设备散热需求动态匹配，确保各区域空气流通充足，避免缺氧或有害气体积聚风险。风压需与矿井通风网络阻力特性协同设计，通过合理配置通风构筑物、优化风机选型及风道布局，维持气流稳定流动。温湿度控制需兼顾人员舒适度与设备运行可靠性，高温高湿环境易引发作业疲劳、设备锈蚀等问题，需通过通风调节维持适宜温湿度范围。有害气体浓度管控尤为关键，氮氧化物、一氧化碳等气体需通过持续监测与通风稀释确保浓度处于安全阈值以下，防止爆炸、中毒等事故发生。

3.2 传统通风方式的局限性

传统通风系统在应对地下铁矿山复杂工况时存在显著短板。其一，人工调控模式依赖经验判断与定期巡检，难以实时响应矿井环境动态变化，如采掘面推进、爆破作业等引发的通风需求波动，常导致局部通风不足或过度问题，影响作业安全与效率。其二，风机运行多采用定速控制，无法根据实际需求动态调节，常出现“大马拉小车”现象，即风机长期高负荷运行但实际通风效率低下，造成显著电能浪费。其三，监测手段落后，传统系统多依赖人工监测点，数据采集频率低、覆盖范围有限，难以及时发现瓦斯浓度异常、风机故障等安全隐患，安全风险识别与处置效率低下，难以满足现代矿山安全高效生产需求。

3.3 智能化需求

地下铁矿山对智能通风系统提出多维度核心需求。实时性方面，系统需具备快速响应能力，能够实时感知矿井环

境变化，如风量波动、有害气体浓度上升等，并在短时间内完成数据采集、分析决策与执行调控，确保通风状态与实际需求动态匹配。可靠性方面，系统需通过冗余设计、故障自诊断等技术手段保障关键设备稳定运行，减少因设备故障导致的系统停机风险，确保通风连续性。节能性方面，系统需通过智能算法优化风机运行策略，根据实际通风需求动态调整风机转速、风门开度等参数，避免无效能耗，降低整体运行成本。

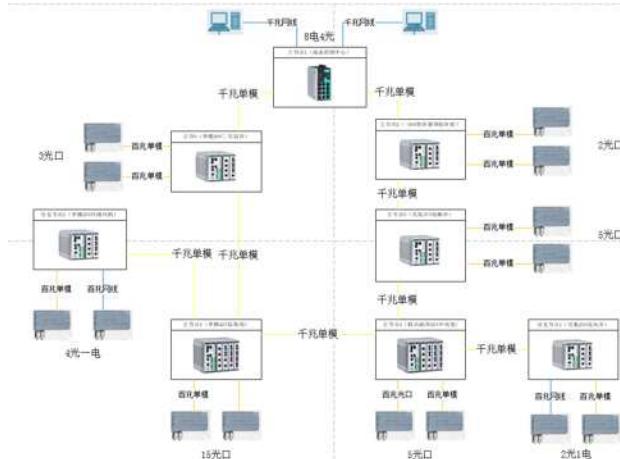
4、智能通风系统在地下铁矿山的应用方案

4.1 系统总体架构设计

智能通风系统采用“云 – 边 – 端”三级协同架构，实现从数据采集到智能决策的全流程闭环管理。终端层作为感知层，部署多参数集成传感器阵列与智能执行机构，前者负责实时采集风量、风压、温湿度及有害气体浓度等环境参数，后者通过变频风机、电动风门等设备执行调控指令。边缘层作为承上启下的计算核心，配置智能网关与边缘服务器，承担数据预处理、本地决策生成及快速响应任务，通过工业以太网或 5G 网络与云端层建立高速通信链路。云端层构建大数据分析平台，集成数据仓库、机器学习引擎与可视化模块，支持历史数据挖掘、长期运行策略优化及全局资源调度，形成“感知 – 决策 – 执行 – 反馈”的完整智能控制链条。该架构通过分层设计实现计算资源的合理分配，既保障了实时性要求，又满足了复杂算法的运算需求，为系统高效稳定运行提供架构支撑。

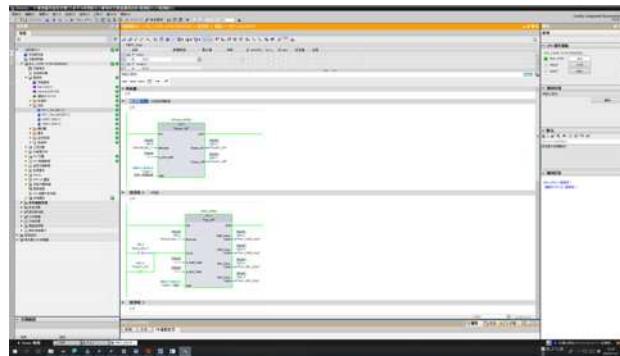
独立中小型 PLC 控制柜 + 现场总线 + 上位机

为每台风机独立配置一套中小型 PLC 控制柜，PLC 柜现场采集风机变频器数据和附近的风速、风压、温度等传感器数据，并通过光纤网络与地表上位机进行通讯，完成程序处理后，直接向变频器发出控制指令进行相应操作。



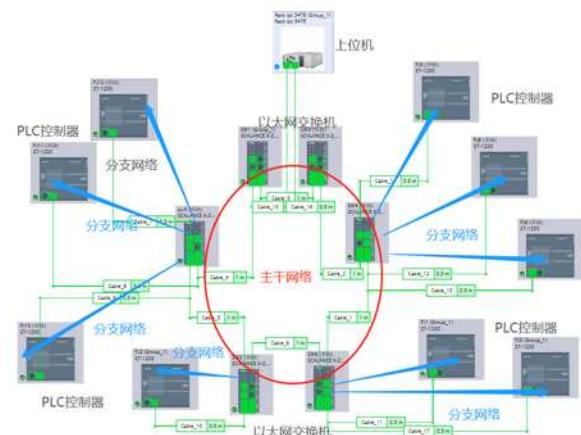
具有以下优点：

- (1) 风机控制程序就地存储和运行，通讯中断不影响风机运行。
- (2) 对系统运维人员技术水平要求一般，操作不当只会影响单台风机运行。
- (3) 可以逐台风机调试，随时可接入通讯网络。



网络拓扑方案：主干环形拓扑 + 分支星型拓扑

主干环网与方案一、二相同。各主节点交换机又与附近的风机 PLC 控制器之间通过新铺设的光纤连接形成星型拓扑结构，各 PLC 直接连接到主节点交换机，使得各 PLC 之间的通讯互不影响。示意图如下：



4.2 传感器布设与数据采集方案

传感器布设遵循“关键区域全覆盖、动态区域随工况调整”的布设原则，确保环境参数监测无死角。在主进风巷、回风巷、采掘工作面等通风关键区域，密集部署高精度多参数传感器，形成立体监测网络；在运输巷道、避灾路线等动态作业区域，采用可移动式传感器节点，根据生产进度实时调整布设位置。数据传输采用 ZigBee 无线组网与有线以太网混合组网模式，构建高可靠性的数据传输通道。采样频率基于工况动态调整，在常规作业时段采用低频采样以降低能耗，在爆破作业、设备启停等工况突变时段自动切换至高频采样模式，确保数据实时性。数据采集系统通过自校准机制与异常值检测算法，保障数据质量，为后续智能决策提供可靠数据基础。

风速传感器有很多种分类，主要可以分为皮托管式风速传感器、螺旋桨风速传感器、霍耳效应电磁风速传感器、热线式风速传感器以及超声波式风速传感器等，检测原理多样、产品性能参差不同。

拟使用以下 4 种不同风速传感器，根据工况安装在不同位置

- 1、FC-2A 三杯式风速传感器（霍耳效应）
- 2、KGF2 矿用风量传感器（超声波）
- 3、GFY15 (B) 型矿用双向风速传感器（皮托管）
- 4、GTx108-F Ebtron 热线式风速风量传感器（热线式）



矿用负(风)压传感器

拟使用以下 3 种不同风压传感器, 每种传感器安装 2 个

- 1、GPD5000F 负压传感器
- 2、KG3033 矿用负压传感器
- 3、KGY3A 型矿用负压传感器



4.3 控制策略模型

控制策略模型以模型预测控制为核心算法, 构建多目标优化调控框架。风机调速模型基于通风网络阻力特性与实时需风量需求, 动态计算最优风机转速, 在满足风量需求的前提下最小化能耗损失。风道可变阻尼调节技术通过改变风道截面形状或调节导流装置角度, 优化风流分布特性, 提升井下各区域风量均匀性, 避免局部通风死角或过通风现象。控制策略模型采用滚动优化机制, 在每个控制周期内基于当前工况与预测模型生成未来时域内的最优控制序列, 并通过闭环反馈修正预测误差, 形成自适应控制能力。该模型有效克服了传统定速控制模式的能耗浪费问题, 实现了通风效率与能耗水平的双重优化。



4.4 人机交互与可视化平台

人机交互与可视化平台基于 WebGL 技术开发三维虚拟矿山模型, 实现通风状态的实时映射与动态展示。平台集成实时数据监测模块, 通过图形化界面展示各区域风量、风压、温湿度及有害气体浓度等参数的实时数值与历史趋势; 历史趋势分析模块支持多参数对比与异常事件追溯, 辅助运维人员定位潜在问题; 故障预警模块通过预设阈值与智能算法识别异常状态, 自动触发声光报警并推送处理建议; 远程控制模块支持管理人员通过 PC 端或移动端设备远程调整系统参数、执行调控指令, 实现跨地域协同管理。平台采用响应式设计, 适配不同终端设备, 提供一致的用户体验, 同时支持权限管理与操作审计功能, 保障系统安全可靠运行, 为矿山智能化管理提供直观、高效的人机交互界面。



5、效果分析

5.1 通风效率提升

智能通风系统通过动态调控策略实现了通风效率的显著提升。在风量分布均匀性方面, 系统通过实时监测各区域风量需求并动态调整风机运行参数, 有效解决了传统系统中常见的“通风死角”与“过通风”问题, 使井下各作业面风量分配更加均衡合理。风速波动幅度大幅降低, 系统通过精确控制风机转速与风门开度, 避免了因工况突变导致的风速剧烈波动, 保障了作业环境的稳定性。响应时间方面, 系统

通过边缘计算节点实现本地快速决策，将环境参数变化到执行机构动作的延迟控制在较短周期内，确保通风状态能及时响应生产需求变化。这种全流程优化不仅提升了作业舒适度，还通过减少无效通风降低了设备损耗，形成了通风效率与设备寿命的双重提升。

5.2 能耗降低

系统通过风机变频调速与风道阻尼优化技术实现了能耗的显著降低。风机运行策略基于模型预测控制算法动态调整，根据实时需风量需求匹配最优转速，避免了传统定速运行模式下的“大马拉小车”现象，大幅减少了无效能耗。风道可变阻尼调节技术通过优化风道流通特性，降低了通风网络阻力损失，进一步提升了能量利用效率。长期运行数据显示，系统在满足同等通风需求的前提下，实现了风机功率的显著下降，年节电量达到显著水平。这种能耗降低不仅直接降低了矿山运营成本，还通过减少电力消耗间接降低了碳排放，符合绿色矿山建设要求，形成了经济效益与环保效益的双重收益。

5.3 安全性提升

系统通过实时监测与智能预警机制显著提升了矿山安全水平。有害气体浓度监测模块实现了对瓦斯、一氧化碳等关键气体浓度的持续跟踪，通过动态阈值设定与异常值检测算法，及时发现浓度异常并触发预警机制。突发事件响应能力通过快速决策与执行链条得到强化，系统在检测到安全威胁时能迅速调整通风参数，如增加风量稀释有害气体或改变风流方向规避危险区域。这种实时安全管控能力有效降低了瓦斯爆炸、中毒等事故风险，同时通过历史数据回溯功能支持事故原因分析，为安全管理体系完善提供了数据支撑，形成了从被动防御到主动预防的安全管理升级。

5.4 经济效益评估

从全生命周期成本视角分析，智能通风系统虽初期投

资略高于传统系统，但通过长期运行效益实现了显著回报。能耗节约是主要经济收益来源，系统通过精准调控降低电力消耗，在运行周期内可积累形成可观的成本节约。事故率降低带来的隐性收益同样显著，通过减少因通风不良导致的停产损失、设备损耗及安全赔偿，系统间接提升了矿山整体运营效率。投资回收期方面，系统通过能耗节约与效率提升，在较短时间内即可收回初期投资成本，后续运行期间持续产生净收益。此外，系统通过延长设备使用寿命、优化人力资源配置等途径，进一步放大了间接经济效益，形成了投资成本与长期收益的良性平衡，为矿山智能化改造提供了可靠的经济性验证。

6、结束语

本研究通过系统构建智能通风系统技术体系，验证了其在地下铁矿山的实际应用价值。研究结果表明，该系统在提升通风效率、降低能耗、增强安全性及经济效益方面表现优异，为矿山智能化转型提供了可复制、可推广的技术方案。未来研究可进一步探索 AI 算法在通风系统中的深度应用，如基于深度学习的故障预测与自适应控制，以推动矿山通风技术向更高水平发展。

参考文献：

- [1] 高科, 戚志鹏, 唐志强, 等. 矿井智能通风研究进展与前沿展望 [J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(02):17-23.
- [2] 张鑫. 煤矿智能通风系统的设计及应用分析 [J]. 矿业装备, 2025, (07):95-97.
- [3] 吉振光. 矿井智能通风系统的设计及应用分析 [J]. 矿业装备, 2024, (08):16-18.

作者简介：黎钊，1987 年 4 月，男，汉族，湖南湘阴，高级工程师，大学本科硕士，研究方向：矿山智能化、矿山装备状态监测与系统管理