

基于数字孪生驱动的矿井通风系统动态演化机理与智能调控策略研究

冯君杰

郑州煤电精煤能源有限公司 河南 新密 452373

摘要：针对矿井通风系统动态演化复杂、调控滞后等难题，提出数字孪生驱动的智能调控策略。构建“虚实映射-动态仿真-智能决策”理论框架，解析通风系统多因素耦合演化机理，建立时变参数表征与高保真动态仿真模型。通过多维异构数据融合与模型置信度进化，实现系统运行状态动态辨识与风险分级预警。依托仿真推演机制生成最优调控方案，形成“感知-仿真-决策-执行”闭环。研究表明，该策略可精准预判通风状态、规避调控风险，为矿井通风本质安全与高效运行提供支撑。

关键词：数字孪生；矿井通风；动态演化；智能调控

引言：矿井通风是保障井下作业安全的核心环节，其系统运行状态随采掘推进、设备工况及环境变化呈现复杂动态演化特征。传统通风管理依赖人工经验与静态解算，存在状态感知滞后、调控精度不足、风险预判缺失等问题，难以适配矿井动态生产需求。数字孪生技术通过虚实精准映射与实时交互，为通风系统动态管控提供新路径。本文构建数字孪生驱动的通风系统理论框架，解析动态演化机理，研究高保真建模与智能调控关键技术，旨在实现通风系统全周期精准管控，提升矿井通风本质安全水平。

1 数字孪生驱动的矿井通风系统理论框架

数字孪生驱动的矿井通风系统理论框架，以“虚实精准映射-动态迭代优化-全周期智能管控”为核心逻辑，打通物理矿井与数字空间的双向数据链路。框架底层依托矿井全域传感网络，实时采集通风机运行参数、巷道风阻、瓦斯浓度、温湿度等多源异构数据，通过多尺度时空配准算法，构建与物理通风系统几何形态、物理属性、运行状态完全一致的高保真数字孪生体，实现物理实体与虚拟模型的毫秒级同步映射。中层核心构建多机理耦合推演模块，融合流体力学仿真、通风网络解算、灾变演化预测多类模型，可精准模拟不同采掘推进、设备故障、突发灾变场景下的通风状态演变，突破传统通风系统离线解算的滞后性瓶颈^[1]。上层搭建闭环智能决策单元，基于孪生仿真结果自动生成通风系统优化调控方案，反向驱动物理通风设备的精准联动调节，形成“感知-建模-仿真-决策-执行”的完整闭环。该框架突破传统矿井通风依赖人工经验、静态管理的局限，覆盖正常采掘、设备运维、灾变处置全场景，为矿井通风系统的本

质安全与高效运行提供全新理论支撑。

2 矿井通风系统动态演化机理与建模方法

2.1 通风系统动态演化的驱动因素分析

矿井通风系统的动态演化是多因素耦合作用下的复杂动态过程，受井下开采活动、环境变化、设备工况及人为干预等多重因素驱动，各因素相互影响、共同改变通风系统的流场分布与运行状态。开采作业是核心驱动因素，随着采掘工作面推进，井下巷道不断延伸、废弃巷道逐步封闭，通风网络拓扑结构持续变化，直接改变风流流向、风量分配及通风阻力分布。环境因素为重要扰动因素，井下温度、湿度、瓦斯及粉尘浓度的动态变化，会改变空气密度与粘性系数，引发通风阻力非线性波动，影响通风系统稳定性。设备工况因素主要包括主通风机、局部通风机的性能衰减、设备故障及风门、风窗的开合状态偏移，会直接导致通风动力与调控参数异常。另外，井下作业人员违规操作、临时施工扰动、巷道围岩变形坍塌等随机因素，也会造成通风系统局部工况突变，引发通风系统动态演化，是通风状态波动、安全风险滋生重要诱因。

2.2 通风系统时变特征参数的表征与提取

通风系统时变特征参数是反映系统动态演化规律的核心指标，其精准表征与高效提取是实现通风系统精准建模与智能调控的前提。矿井通风系统时变参数涵盖通风阻力、风量、风压、风速、通风机工况参数及巷道通风效率等核心指标，具备非线性、时变性、随机性的显著特征。针对各类参数的差异化特征，需构建标准化表征体系，通过量化公式定义参数动态变化规律，区分趋势性变化、周期性波动与突发性突变三种参数演化形

态。在参数提取层面,依托井下分布式传感器、物联网监测设备,实现全测点数据高频采集,覆盖井下主要巷道、采掘工作面及通风设备关键点位。引入数据预处理算法,剔除监测数据中的噪声、异常值与缺失值,通过滑动窗口滤波、趋势拟合等方法,精准提取参数实时数值、变化速率、波动幅度等核心特征。结合通风网络拓扑关系,关联不同点位参数的耦合变化特征,实现多维度、全时段时变参数精准提取,为动态建模与状态评价提供精准数据支撑^[2]。

2.3 动态演化数学模型与仿真方法

矿井通风系统动态演化数学模型是量化系统运行规律、复刻动态演化过程的核心工具,需适配通风系统非线性、时变、多耦合的运行特性。基于流体力学、通风网络拓扑理论及能量守恒定律,构建通风系统动态演化基础数学模型,包含通风阻力动态计算模型、风量风压耦合传输模型、通风动力衰减模型三大核心模块,精准量化巷道结构、环境参数、设备工况对通风流场的影响。针对开采扰动、环境突变等动态场景,引入时变修正系数,优化模型参数迭代机制,解决传统静态数学模型无法适配工况动态变化的问题。在仿真方法层面,采用数值仿真与虚实联动仿真相结合的方式,依托有限元分析、通风网络解算算法,实现通风流场动态模拟、风量分配实时演算及异常工况推演。同时结合数字孪生模型实时数据,实现仿真模型与实体系统工况同步更新,突破传统仿真静态模拟、滞后性严重的缺陷,可精准复现通风系统演化全过程,预判不同工况下系统运行状态变化趋势。

2.4 通风系统运行状态的动态评价方法

通风系统运行状态动态评价是及时识别通风隐患、保障通风安全的关键手段,区别于传统静态评价模式,该方法聚焦系统动态演化特征,实现全时段、全方位状态研判。首先构建多维度动态评价指标体系,涵盖通风稳定性、通风有效性、设备可靠性、安全风险性四大维度,包含风量合格率、阻力均衡度、设备运行故障率、瓦斯稀释效率等核心指标,全面覆盖通风系统运行核心要素。引入层次分析法与熵权法融合的组合赋权方式,科学界定各指标权重,规避单一赋权方法的主观性偏差。基于动态监测数据与仿真结果,采用模糊综合评价算法,实时更新各指标评分与系统综合运行状态评分,将通风状态划分为优秀、良好、一般、隐患、危险五个等级。建立状态动态溯源机制,针对评分异常波动情况,反向定位通风系统故障点位与演化诱因,实现通风状态实时评价、异常精准溯源、风险动态预判,为后续

智能调控提供精准依据。

3 通风系统数字孪生模型构建关键技术

3.1 物理通风系统的数字化描述

物理通风系统的数字化描述是构建数字孪生模型的基础,旨在实现实体系统全要素的高精度复刻。该技术以矿井实体为基准,全面梳理并构建标准化描述体系。在巷道层面,依托地质与测绘数据,精准复刻巷道的长度、断面、坡度及粗糙度等结构参数,还原三维空间拓扑关系。在设备层面,对主通风机、局部通风机、风门及密闭等设施进行参数化建模,录入额定参数与运行特性。同时,整合井下作业区与气体扩散范围等场景要素,实现空间结构、设备属性与工况场景的全方位数字化。最终通过三维建模技术搭建可视化场景,实现实体通风系统1:1精准映射,保障数字模型与物理实体在空间、参数及场景上的高度一致性与完整性。

3.2 多维异构数据融合与参数校正

矿井通风数据具有多源、异构及时序差异特征,数据融合与参数校正是保障模型精准度的关键。针对传感器数值、设备日志、监控视频及空间数据等格式与频率不一、易存在冗余缺失的问题,首先,构建统一的多源数据接入框架,完成标准化预处理^[3]。其次,引入加权融合算法与时空融合模型,对不同点位与时段的监测数据进行关联融合,挖掘潜在耦合关系以弥补单一维度局限。最后,建立参数动态校正机制,以通风理论和现场实测为基准,对比仿真与实测偏差,通过迭代修正算法实时校正模型参数,消除各类误差,确保融合数据精准适配模型需求,提升孪生模型的虚实同源性。

3.3 高保真动态仿真模型构建

高保真动态仿真模型是实现工况推演与状态预判的核心载体。该模型以数字化框架为基础,融合流体力学、通风网络解算及设备动态响应算法,搭建多物理场耦合体系。针对空气流动与热量传递等过程,优化复杂结构的仿真网格以提升精度。结合系统时变特征,引入动态迭代更新机制,依托实时数据驱动模型参数与边界条件更新,解决传统静态模型无法适配动态工况的痛点。同时,精准复刻风机启停、风门调控等动态工况,实现各类作业与故障场景的推演。通过反复对标现场实测数据优化仿真精度,最终构建具备高真实性与高适配性的模型,满足通风状态复现与调控推演需求。

3.4 模型置信度评估与进化机制

模型置信度评估与进化机制是保障数字孪生模型长期稳定运行的核心体系。该机制围绕数据精准度、仿真匹配度与工况适配度构建量化指标,通过对比仿真与

实测数据的偏差率、响应同步率等,量化模型置信度等级。针对低置信度问题,建立多维度溯源机制,精准定位数据偏差或算法滞后等诱因。同时构建自主进化机制,依托持续更新的运行与工况数据,驱动算法迭代、参数优化及场景库扩容。针对新增巷道或设备,自动完成模型结构更新与适配调试,实现动态优化与自主升级。通过常态化评估与持续进化,保障模型在全周期内保持高精度度与高适配性,满足长期智能化管控需求。

4 基于数字孪生的通风系统智能调控策略

4.1 智能调控的目标体系与约束条件

基于数字孪生的矿井通风系统智能调控,以安全、高效、节能、稳定为核心目标,构建多层次、全方位的调控目标体系,同时结合矿井生产实际设定严格约束条件。调控目标体系分为基础安全目标、运行高效目标、经济节能目标三个层级,基础安全目标保障井下各作业区域风量充足、风速合规、有害气体浓度达标,杜绝通风安全隐患;运行高效目标实现通风网络风量合理分配、系统运行稳定,适配采掘作业动态工况需求;经济节能目标优化通风设备运行参数,降低通风系统能耗,实现绿色高效运行。约束条件主要包含安全约束、设备约束、工况约束三类,安全约束需严格遵循矿山通风安全规程,保障各项通风参数符合安全标准;设备约束限定通风机、风门等设备的运行阈值、调控范围,避免设备超量程运行;工况约束结合开采进度、作业类型、环境状态,限定调控时机与调控幅度,杜绝盲目调控。通过明确目标与约束,保障智能调控方案安全合规、科学可行。

4.2 通风系统运行状态动态辨识与风险预警

通风系统运行状态动态辨识与风险预警是智能调控的前置核心环节,依托数字孪生模型的实时感知与仿真能力,实现隐患早识别、早预警、早处置。基于实时监测数据与模型仿真结果,通过特征参数比对、演化规律分析、异常趋势研判,实现通风系统运行状态的动态辨识,精准区分正常运行、轻微异常、重大隐患、危险失控四种运行状态。结合风险严重程度、影响范围、演化速度,将风险划分为四级预警等级,对应推送差异化预警信息。系统可自动溯源风险诱因,定位故障巷道、异常设备及工况扰动源头,同步生成风险演化趋势预判结果。该技术彻底改变传统人工巡检、事后处置的管控模

式,实现通风风险动态辨识、分级预警、趋势预判,为后续精准智能调控争取处置时间、提供决策依据。

4.3 调控决策的仿真推演机制

调控决策仿真推演机制是保障通风智能调控科学精准、规避调控风险的核心关键,依托数字孪生虚实联动优势,实现调控方案预演、优化与优选。该机制以高保真动态仿真模型为载体,针对通风系统异常工况与风险隐患,结合预设调控目标与约束条件,自动生成多套差异化调控方案,涵盖风机调频、风门开合、风窗调控等不同调控组合方式^[4]。通过仿真模型对各套调控方案进行全流程推演,模拟调控过程中通风风量、风压、流场分布的动态变化,预判调控后的系统运行状态、风险消除效果及潜在次生风险。构建调控方案评价模型,从安全可靠、调控高效性、能耗经济性三个维度,量化评分各方案优劣,自动筛选最优调控方案。完成方案优选后,将调控指令同步下发至通风设备,实现仿真推演、方案优选、精准调控的闭环联动,有效规避盲目调控引发的风流紊乱、工况突变等问题,大幅提升矿井通风系统调控的智能化、精准化与安全性。

结束语

本文构建了数字孪生驱动的矿井通风系统智能调控体系,明确系统动态演化机理与建模方法,突破多维数据融合、高保真仿真、模型置信度进化等关键技术。通过搭建“感知-仿真-决策-执行”闭环调控机制,实现通风状态动态辨识、风险分级预警与调控方案精准推演,有效解决传统通风管理滞后性、盲目性问题。该研究为矿井通风系统智能化升级提供了理论支撑与技术路径,后续可结合井下实测数据进一步优化模型精度,拓展多灾种耦合场景下的调控应用,助力矿山安全高效开采。

参考文献

- [1]郭佳佳.煤矿矿井通风系统优化设计及应用[J].凿岩机械气动工具, 2026, 52(2): 205-207.
- [2]上官宇飞.矿井通风系统中风速与风压协同优化技术分析[J].能源与节能,2026(2):132-135.
- [3]温军.矿井通风技术及通风系统优化设计[J].能源与节能,2026(4):120-122.
- [4]马金鑫.智能矿井通风安全监控系统设计与运用[J].西部探矿工程, 2026, 38(3):176-178.