

# 煤矿井下智能化采掘装备与运输系统协同应用研究

刘碧慧

鄂尔多斯市国源矿业开发有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

**摘要:** 煤矿智能化建设中,采掘装备与运输系统的协同运行是提升生产效率与安全水平的关键环节。本文针对当前采掘与运输系统独立运行、信息孤岛严重、产运衔接不畅等问题,系统分析了生产能力匹配、煤流负荷均衡、信息交互决策及设备状态协同等关键制约因素。在此基础上,提出了煤流均衡控制、采掘运输协同调度、设备协同运维及数字孪生协同仿真四项关键技术,构建了采运协同的技术框架。同时从技术标准、人员培训和冗余安全三个维度提出了应用保障体系,为煤矿井下智能化采掘与运输系统的高效协同提供了理论支撑与实践指导。

**关键词:** 智能化采掘; 运输系统; 协同控制

**引言:** 随着煤矿智能化建设的深入推进,采掘装备与运输系统的智能化水平显著提升,但两者之间的协同运行仍是制约矿井整体效率的瓶颈。采掘系统负责煤岩的破碎与装载,运输系统负责煤流的转载与外运,二者在产能匹配、时序衔接和信息共享等方面存在明显脱节,导致设备空转、煤流堵塞和安全隐患频发。传统的独立控制模式已无法满足智能矿井对高效安全生产的需求,亟需构建采掘与运输系统的协同控制体系。本文围绕采运协同的关键问题与技术展开研究,旨在为煤矿智能化转型提供系统解决方案。

## 1 智能化采掘装备与运输系统概述

### 1.1 智能化采掘装备系统

智能化采掘装备系统是煤矿井下生产的核心执行层,主要包括智能化采煤机、掘进机及其配套的感知、决策与控制系统。采煤机已实现记忆截割、姿态感知和远程控制功能,通过惯性导航与激光定位实现自主行走和截割路径规划。掘进机具备自动导向、恒阻截割和智能支护功能,可根据围岩条件自适应调整截割参数。配套系统涵盖液压支架电液控制、锚杆机自动打钻和智能供液系统。当前采掘装备正向少人化、无人化方向发展,但设备间的协同联动能力仍需提升,尤其在采掘进度与后续运输环节的衔接上存在明显短板,制约了整体生产效率的发挥。

### 1.2 矿井运输系统

矿井运输系统承担着煤炭从采掘工作面到地面的全流程转载与运输任务,主要包括带式输送机系统、无轨胶轮车、单轨吊和轨道机车等多种运输方式。带式输送

机智能化水平较高,已实现智能调速、异物检测、张力自动控制和 predictive maintenance。无轨胶轮车正在推广无人驾驶技术,融合激光雷达、视觉和惯导实现自主导航与编队运行。单轨吊和轨道系统也在推进智能调度与信号联锁。然而,不同运输方式之间的换装环节效率低下,运输调度仍以人工经验为主,缺乏与采掘系统的实时联动。运输系统的瓶颈效应在高产矿井中尤为突出,成为制约采掘效能释放的关键因素<sup>[1]</sup>。

### 1.3 采掘与运输的系统关联

采掘与运输系统在煤矿生产中构成紧密耦合的产运链条。采掘系统的产量与推进速度直接决定运输系统的负荷需求,运输系统的容量与调度效率反过来制约采掘系统的生产能力发挥。二者在时间维度上要求严格的时序匹配,采煤机截割后刮板输送机、转载机和带式输送机需连续协调运转,任何环节的中断都会导致全线停机。在空间维度上,运输巷道的通过能力限制了采掘设备的布局与回采顺序。信息维度上,采掘装备的工况数据需实时传输至运输调度系统,运输系统的运行状态也应反馈给采掘系统以调整生产节奏。三者的深度关联决定了协同控制的必要性与复杂性。

## 2 采掘与运输协同运行的关键问题分析

### 2.1 生产能力匹配问题

采煤机的理论截割能力远超运输系统的实际运输能力时,会导致刮板输送机和转载机频繁满仓,迫使采煤机频繁停机等待,设备开机率大幅下降。反之,运输能力远超采掘能力时,大量输送设备空载运行,造成电能浪费和设备磨损。当前矿井设计中,采掘与运输能力通常按最大工况匹配,但实际生产中煤层条件变化、设备故障等因素导致产能波动,固定匹配关系难以适应动态变化。缺乏实时产能预测与动态调配机制,是造成采运

**个人简介:** 刘碧慧, 1984年3月生, 男, 汉族, 内蒙古自治区呼和浩特市, 本科学历, 中级职称, 研究方向: 机电技术专业。

失衡的根本原因,亟需建立基于实时数据的产能动态匹配模型与自适应调节策略。

## 2.2 煤流负荷均衡问题

煤矿井下运输系统通常由多条带式输送机串联组成,各段输送机的带宽、带速和运输能力不同,煤流在转载点容易出现堆积或断流。当采掘系统集中出煤时,短时间内大量煤涌入运输系统,造成转载点堵塞和输送机过载;采掘间歇期则输送机空转,负荷率极低。煤流的不均匀性还导致输送机频繁启停,加速设备损耗并增加安全风险。目前缺乏有效的煤流缓冲与智能分配机制,各转载点的给料量无法根据下游运输能力自动调节<sup>[2]</sup>。解决煤流负荷均衡问题需要从源头控制出煤节奏和末端优化运输调度两方面协同入手。

## 2.3 信息交互与决策问题

采掘装备与运输系统分属不同厂商和控制平台,通信协议不统一,数据格式各异,形成严重的信息孤岛。采煤机的截割速度、掘进机的推进行进尺等关键生产数据无法实时传输至运输调度系统,运输系统的带速、仓位、故障等状态信息也难以及时反馈给采掘操作面。决策层面,采掘司机与运输调度员各自为政,缺乏统一的协同决策平台。当出现运输瓶颈时,采掘面无法及时获知并调整产量;当采掘进度超前时,运输系统来不及调配运力。信息交互的滞后与决策的割裂导致采运系统整体响应速度慢,协同效率低下。

## 2.4 设备状态协同问题

采掘装备与运输设备的运行状态相互影响,采煤机截齿磨损或液压系统故障会导致产量骤降,影响运输系统的煤源供给;带式输送机托辊故障或电机过热会导致运输中断,迫使上游采掘设备紧急停机。当前设备维护采用独立的检修模式,采掘系统与运输系统的检修计划互不协调,经常出现运输系统检修时采掘系统仍在生产、或采掘系统停机检修而运输系统仍在空转的矛盾。缺乏基于设备状态的协同维护策略,导致非计划停机频繁,设备综合效率低下。建立采掘与运输设备的联动状态监测与协同运维机制迫在眉睫。

# 3 采掘与运输协同关键技术

## 3.1 煤流均衡控制技术

煤流均衡控制技术旨在解决采掘出煤的间歇性、脉冲性与运输系统对连续性、平稳性要求之间的结构性矛盾。该技术的物理实现路径是在采掘工作面出煤口与主运输皮带之间嵌入智能缓冲仓,吸纳采煤机割煤速度波动带来的瞬时峰值煤量,再通过变频给料机以可控速率向下游释放,将不规则的输入转化为规则的输出。在

运输巷道各转载点,智能调速装置根据下游输送机的实时负荷自动调节带速:下游重载时降速防堆煤,下游轻载时提速均衡分配。控制系统核心采用模型预测控制算法,在每个控制周期内基于当前各段皮带的煤量分布和缓冲仓料位,对未来时域内的煤流演进趋势进行滚动预测,求解使煤流波动最小化且能耗最优化的给料速率与带速组合序列。针对煤层厚度突变、顶煤垮落不均等难以精确建模的扰动因素,算法中嵌入了模糊控制规则库作为补偿模块,依据采煤机电流变化率和历史经验对预测结果进行修正,确保系统在复杂地质条件下仍能保持稳定可靠的均衡效果<sup>[3]</sup>。

## 3.2 采掘运输协同调度技术

采掘运输协同调度技术解决的是比煤流均衡更长时间尺度上的产运匹配问题,核心思想可概括为“预测先行、反馈修正、分布执行”。该技术构建双层决策架构,将战略层面产能规划与战术层面实时调控分离。上层调度器负责预测与规划:基于采煤机记忆截割系统记录的截割轨迹和牵引速度,结合三维地质模型中煤层厚度、夹矸分布等空间信息,预测未来一个班次的产量曲线;再以皮带额定能力、煤仓容量及提升系统约束为边界条件,求解最优运输能力配置方案,包括各段皮带目标速度、缓冲仓目标料位及多采掘面产量配额。下层调度器负责执行与修正:接收上层方案后分解为控制指令下达各运输单元,同时以秒级频率监测皮带秤实测煤量与规划值的偏差,偏差超出容忍范围时触发滚动修正。各运输单元被建模为具有自主决策能力的智能体,采用多智能体强化学习框架训练,使各单元在追求自身效率的同时学会协作,系统行为收敛至全局最优。5G专网的低延迟特性确保上层指令及时传达,也为智能体间状态共享与协同决策提供通信保障。

## 3.3 设备协同运维技术

煤矿采掘与运输设备的运维管理长期处于隔离状态——采煤机归综采队、皮带机归运输队,检修计划各自排定、故障处置各自为战。这种模式在设备独立运行时尚可,但在采掘与运输深度耦合的智能化场景下,割裂的运维体系成为制约系统效能的突出瓶颈。设备协同运维技术针对这一痛点,提出建立覆盖采掘与运输全环节的统一健康管理平台。平台在感知层整合振动、温度、油液状态、电流谐波等多源传感器数据,经边缘节点初步处理后传入分析层,由深度学习算法进行模式识别,自动学习设备正常行为特征,偏离即判定异常并预测剩余寿命。关键创新在于跨系统故障传播模型——当预测运输系统某设备即将故障时,系统评估失效后对上

游采掘设备的影响,并建议提前调整采煤机至易停机区段,避免煤流中断引发连锁停机。检修计划则采用协同优化算法,将采掘与运输设备的检修时间窗口智能匹配,使检修活动尽可能重叠,压缩全系统非生产性停机时间。该体系推动设备管理从事后被动维修、定期预防维修,迈向基于实时状态的预测性主动维护。

### 3.4 数字孪生协同仿真技术

数字孪生协同仿真技术为采掘与运输系统的协同优化提供虚拟验证平台,该技术构建采掘装备、运输设备和巷道环境的高保真数字孪生体,实现物理系统与虚拟模型的实时双向映射。仿真平台集成多体动力学、离散事件仿真和计算流体力学等多种仿真引擎,可模拟不同采掘工况下煤流在运输系统中的动态传播过程。通过在虚拟环境中进行大量协同策略的对比试验,筛选最优控制参数和调度方案后再部署到物理系统,大幅降低试错成本。平台还支持“what-if”场景分析,可快速评估设备增减、巷道改造等方案对采运协同效果的影响,为矿井生产规划提供决策支持。

## 4 采运协同应用保障体系

### 4.1 技术标准与规范

采运协同应用需要完善的技术标准与规范体系作为支撑,当前煤矿智能化建设中,采掘装备与运输系统的接口标准、通信协议和数据格式缺乏统一规范,导致不同厂商设备难以互联互通。应加快制定采掘运输协同控制的行业标准,明确设备间通信接口、数据交换格式、协同控制指令集和安全联锁要求。建立采运协同系统的测试认证体系,对协同调度算法的安全性、可靠性和实时性进行标准化评测。同时制定矿井采运协同的设计规范,在新矿井建设阶段即将采掘与运输系统的协同需求纳入整体设计,避免后期改造的高成本。标准体系的完善是采运协同技术大规模推广的前提条件。

### 4.2 人员培训与技能提升

采运协同系统的有效运行对人员素质提出了更高要求,传统煤矿岗位分工明确,采掘司机、运输调度员和设备维修工各司其职,而协同系统要求人员具备跨系统的知识储备和协同操作能力。应建立分层分类的培训体系,对管理层开展协同理念与决策培训,对技术人员开

展系统集成与算法调试培训,对操作人员开展协同系统操作与应急处置培训<sup>[4]</sup>。利用数字孪生仿真平台搭建虚拟培训环境,让操作人员在安全可控的条件下熟悉协同系统的运行逻辑和异常处理流程。同时培养既懂采掘工艺又懂运输调度的复合型人才,打破专业壁垒,为采运协同系统的持续优化提供人才保障。

### 4.3 安全冗余与应急保障

安全是采运协同系统应用的底线要求,协同系统高度依赖通信网络和自动化控制,一旦通信中断或控制系统故障,可能导致采掘与运输系统同时失控,后果严重。必须建立多层次安全冗余体系,通信层面采用5G+WiFi6+漏泄电缆的多网融合架构,确保任何单点故障不影响关键控制指令传输。控制层面设置独立的安全PLC系统,当协同控制系统异常时自动切换至安全模式,执行预设的降级运行策略。应急层面制定采运协同专项应急预案,明确通信中断、设备故障、瓦斯超限等场景下的采掘停机和运输疏散流程,定期开展联合应急演练,确保人员安全和设备保护万无一失。

### 结束语

煤矿井下智能化采掘装备与运输系统的协同应用是实现矿井高效安全生产的必由之路。本文系统分析了产能匹配、煤流均衡、信息交互和设备状态四大关键问题,提出了煤流均衡控制、协同调度、协同运维和数字孪生仿真四项关键技术,并构建了标准规范、人员培训和安全冗余三位一体的保障体系。研究表明,采运协同可显著提升设备利用率和生产效率,降低能耗与安全风险。未来应进一步深化AI大模型在协同决策中的应用,推动全矿井多系统深度融合,加速煤矿智能化建设进程。

### 参考文献

- [1]宋德军,王治伟,张凡.煤矿智能无轨辅助运输装备关键技术研究与应用[J].中国煤炭,2023,49(7):81-88.
- [2]周开平.煤矿智能化掘进成套装备工艺及技术研究[J].煤炭工程,2025,57(4):12-18.
- [3]王国法,任怀伟,富佳兴.煤矿智能化建设高质量发展难题与路径[J].煤炭科学技术,2025,53(1):1-18.
- [4]张帅,陈征,杨伟东.煤矿井下智能化高效掘进控制体系的研究[J].冶金管理,2023,(13):15-17.