

智能化采煤作业中的关键技术——采煤机与液压支架协同控制技术研究

刘志强 苏欣

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 智能化采煤是煤炭行业高质量发展的核心方向,采煤机与液压支架作为井下采煤核心设备,其协同运行效率关乎采煤的安全性、连续性与智能化程度。传统协同控制模式存在响应滞后、适配性差、抗干扰弱等问题,难以满足复杂地质下精准控制需求。本文结合智能化采煤实际,梳理协同控制理论与关键技术,重点研究多源信息感知等核心技术,创新自适应协同控制策略,构建并验证协同控制模型。结果显示,优化技术可提升协同精度与响应速度,减少人工干预,为智能化采煤提供支撑,推动全流程智能化转型。

关键词: 智能化采煤;采煤机;液压支架;协同控制;数字孪生

引言:煤炭是我国能源安全的重要保障,开采模式正从机械化、自动化向智能化转变。智能化采煤作业能解决井下作业环境差、劳动强度大、安全风险高、生产效率低等痛点。采煤机负责煤炭切割与装载,液压支架保障顶板支护与作业空间安全,二者协同是连续高效采煤的前提。当前,我国智能化采煤协同控制技术存在设备协同精度不足、地质适配性差、控制决策滞后等短板,易引发采煤效率下降、顶板支护失效等隐患。本文聚焦该技术,研究理论、技术与策略,助力煤炭行业智能化、安全化、高效化发展。

1 采煤机与液压支架协同控制理论基础

1.1 智能化采煤作业系统组成

智能化采煤作业系统是复杂闭环系统,围绕采煤机与液压支架协同作业构建,含设备、感知、控制、决策与数据五大核心层。设备层是基础,除采煤机、液压支架外,还有刮板输送机等辅助设备。采煤机负责切割、装载煤层,液压支架同步移动支护顶板,刮板输送机转运煤炭。感知层采集运行与环境数据,部署多种传感器,全面感知采煤机位置、速度,液压支架支护阻力等。控制层生成并执行协同控制指令,决策层依感知数据与预设模型优化策略、制定决策。数据层负责数据存储、处理与共享,为决策和控制提供支撑。五大层级紧密相连,构成完整智能化采煤协同作业体系。

1.2 协同控制的核心需求

鉴于智能化采煤作业的复杂、安全与连续要求,采煤机与液压支架协同控制核心需求在精准、同步、自适应和安全四方面,相互关联。精准性要求液压支架精准跟随采煤机轨迹,匹配支护位置与采煤进度,控制误

差,防止顶板问题或采煤受阻。同步性强调二者动作一致,速度协同,避免采煤机或支架超前滞后,保障作业连续^[1]。自适应针对井下地质变化,系统要快速响应,调整参数与节奏。安全性是前提,需保障人员与设备安全,实时监测风险参数,异常时预警并采取应急措施,杜绝事故。

1.3 关键技术体系

采煤机与液压支架协同控制技术体系以协同控制为核心,整合感知、建模、决策、通信四大关键技术,相互支撑。多源信息感知与融合技术是基础,采集设备运行及井下地质、环境数据,融合处理提升精准度,为建模和决策提供可靠数据。动态建模与数字孪生技术是核心支撑,构建数字孪生模型,实现物理与虚拟实时映射,模拟运行与协同过程,为策略优化和仿真验证提供载体。智能决策与协同控制算法是核心驱动力,基于感知数据和模型,用智能算法制定决策、优化参数,实现精准协同。通信网络与边缘计算技术是保障,构建高速稳定通信网络,边缘计算就近处理数据,降低延迟,确保指令快速执行。

2 采煤机与液压支架协同控制关键技术

2.1 多源信息感知与融合技术

多源信息感知与融合技术是采煤机与液压支架协同控制的基础,旨在全面、精准、实时采集与处理井下关键数据,为协同控制决策提供可靠支撑。感知上,采用多类型传感器协同部署。针对采煤机,部署位置、速度、扭矩等传感器,采集其切割速度、移动速度等运行参数;针对液压支架,部署压力、位移、角度等传感器,获取支架支护阻力等参数;针对井下环境与地质,

部署顶板压力、煤层厚度等传感器，采集顶板位移、煤层参数等数据。数据融合时，运用分层融合策略。先对单一传感器数据进行预处理，消除噪声与误差；再借助卡尔曼滤波算法、神经网络算法等，融合分析不同来源和类型的数据，整合冗余信息、弥补单一传感器不足，提升数据精准度与可靠性，最终输出标准化融合数据，为动态建模和智能决策提供高质量的数据支持。

2.2 动态建模与数字孪生技术

动态建模与数字孪生技术是实现采煤机与液压支架精准协同控制的核心支撑，通过构建虚拟数字模型与物理设备的实时映射，实现设备运行状态的可视化监测、协同过程的模拟仿真与控制策略的优化迭代。首先，基于采煤机、液压支架的结构参数、运行原理，结合井下作业场景的地质条件，构建物理设备与作业环境的三维数字孪生模型，精准还原设备的结构特征、运行规律与井下环境的空间分布。其次，建立物理设备与虚拟模型的实时数据交互通道，将多源信息感知与融合后的运行参数、环境数据实时传输至数字孪生模型，实现虚拟模型与物理设备的实时同步映射，可通过虚拟模型直观查看设备运行状态、协同动作效果及井下环境变化^[2]。最后，利用数字孪生模型的模拟仿真功能，模拟不同地质条件、不同控制参数下采煤机与液压支架的协同运行过程，分析协同效果，识别潜在的动作冲突、控制偏差等问题，为协同控制策略的优化与验证提供虚拟试验平台，降低物理试验成本与安全风险。

2.3 智能决策与协同控制算法

智能决策与协同控制算法是采煤机与液压支架协同控制的核心动力，能依据感知融合数据和数字孪生模型，制定协同控制决策、优化控制参数、生成动作指令，实现精准协同。传统控制算法存在响应滞后、适配性差的问题，结合智能化采煤需求，采用融合遗传算法、模糊控制算法与神经网络算法的混合智能算法构建协同控制决策模型。此算法能发挥各算法长处，遗传算法实现控制参数全局优化，模糊控制算法增强系统对复杂不确定因素的适配力，神经网络算法使控制策略可自学习与自适应调整。算法运行时，实时接收感知融合数据和数字孪生模型反馈信息，结合预设协同控制目标，自动分析采煤机与液压支架运行状态偏差，优化移架速度等控制参数，生成精准动作指令，确保二者协同。同时，它具备自学习能力，能根据井下地质条件和设备运行状态变化，自动优化控制策略，提升协同控制的适应性与精准度。

2.4 通信网络与边缘计算技术

通信网络与边缘计算技术是保障采煤机与液压支架协同控制高效运行的关键支撑，核心解决井下数据传输延迟、信号干扰、数据处理效率低等问题，确保控制指令快速、精准传输与执行。井下作业环境复杂，存在电磁干扰强、空间狭窄、粉尘多等问题，传统通信方式难以满足协同控制的实时性需求，因此构建基于5G与工业以太网的双模通信网络，5G技术实现高速、低延迟的数据传输，传输延迟控制在毫秒级，工业以太网实现设备间的稳定组网，扩大通信覆盖范围，同时采用信号屏蔽、抗干扰处理等措施，提升通信网络的抗干扰能力，确保感知数据与控制指令的稳定传输。边缘计算技术的应用，将数据处理任务从云端迁移至井下边缘节点，实现感知数据的就近采集、就近处理，减少数据传输量与传输延迟，快速完成数据融合、状态分析与控制指令生成，避免云端处理延迟导致的协同控制偏差，同时边缘节点具备本地存储与应急处理功能，当通信中断时，可临时自主执行基础协同控制任务，保障采煤作业持续开展。

3 采煤机与液压支架协同控制策略创新与模型构建

3.1 协同控制策略创新设计原则

采煤机与液压支架协同控制策略的创新设计，需立足智能化采煤作业实际，结合井下地质条件的复杂性、设备运行的不确定性与作业安全的核心需求，遵循四大核心设计原则，确保策略的科学性、实用性与创新性。安全性优先原则是核心前提，所有控制策略的设计均需优先保障井下作业人员与设备安全，实时监测顶板压力、支架支护状态等风险参数，设置安全阈值，出现异常时及时触发预警并执行应急控制措施，杜绝安全事故发生。自适应适配原则强调策略需具备较强的自适应能力，能够实时响应井下煤层厚度、倾角、顶板硬度等地质条件的变化，自动调整控制参数与动作节奏，避免地质条件变化导致的协同失控。精准协同原则要求策略能够实现采煤机与液压支架动作的精准匹配，优化移架、支护与采煤的协同节奏，减少动作偏差，提升采煤效率与支护质量。高效节能原则注重控制策略的节能性，通过优化控制参数，合理调整设备运行速度与负载，降低设备能耗，同时减少设备磨损，延长设备使用寿命，实现经济效益与社会效益的双重提升^[3]。

3.2 融合地质动态感知的自适应协同控制策略创新

3.2.1 策略整体框架设计

融合地质动态感知的自适应协同控制策略突破传统固定模式局限，以地质动态感知数据驱动，构建“感知 - 分析 - 决策 - 执行 - 反馈”闭环框架，实现采煤机与液压支架动态自适应协同。该框架分五层：地质动态感知层

部署各类地质传感器,实时采集煤层厚度、顶板位移等参数,动态监测地质条件;数据融合分析层融合地质与设备运行数据,分析地质变化趋势和设备状态偏差,识别关键影响因素;智能决策层依据融合结果,结合预设目标与创新算法制定决策,优化控制参数;协同执行层将指令下发给设备,实现精准协同;反馈优化层采集设备执行效果和地质变化反馈信息,反馈给智能决策层,迭代优化控制策略,形成闭环,确保策略适配井下动态环境。

3.2.2 关键子策略设计

融合地质动态感知的自适应协同控制策略含三大关键子策略,协同优化整体效果。地质动态预测子策略基于历史和实时地质数据,用神经网络预测算法,预测煤层厚度等参数变化趋势,提前识别地质突变风险,为协同决策争取时间,避免失控。采煤机自适应控制子策略依据地质预测和实时数据,自动调整切割速度、移动速度和高度,煤层厚度变时调切割高度,顶板压力大时降采煤速度。液压支架自适应协同子策略根据采煤机动作和地质数据,自适应调整移架、支护动作,采用“跟机移架+超前支护”结合方式,确保与采煤机精准协同,保障作业安全连续。

3.3 采煤机与液压支架协同控制模型构建

基于融合地质动态感知的自适应协同控制策略,结合采煤机与液压支架运行原理、协同关系及井下作业约束,构建协同控制模型,实现协同控制的量化与精准。该模型以采煤效率最大化、支护安全性最高、设备能耗最小化为多目标优化目标构建函数,同时考虑井下地质条件、设备运行参数以及协同动作等约束条件。模型由数据输入、协同决策和动作执行三个核心模块构成。数据输入模块接收经多源信息感知与融合后的设备运行、地质动态及环境数据,为模型运行提供支撑;协同决策模块依据输入数据,结合创新智能算法与关键子策略,完成多目标优化决策,生成控制参数与动作指令;动作执行模块将指令转化为设备可执行的控制信号,控制设备动作,并实时采集执行数据反馈给模型,实现模型参数动态调整^[4]。模型采用模块化设计,各模块既相互独立又紧密关联,方便后续修改、优化与扩展,能够适配不同地质条件和设备类型的智能化采煤作业需求,为高效、安全采煤提供有力保障。

3.4 控制模型仿真验证与优化

为验证采煤机与液压支架协同控制模型的可行性、有效性与优越性,采用MATLAB/Simulink仿真软件,搭建仿真试验平台,结合某煤矿智能化采煤工作面的实际参数,设置仿真场景与对比组,完成仿真验证与优化。仿真场景模拟井下复杂地质条件,包含煤层厚度变化、顶板压力波动等动态场景,设置优化后的协同控制模型为试验组,传统协同控制模型为对比组,选取协同控制精度、响应时间、采煤效率、支护成功率等作为核心评价指标。仿真结果显示,试验组协同控制精度较对比组提升35%以上,控制响应时间缩短40%以上,采煤效率提升20%以上,支护成功率达到98%以上,显著优于传统协同控制模型。针对仿真过程中出现的模型参数适配性不足、极端地质条件下协同精度略有下降等问题,优化调整模型的目标函数权重与控制参数,完善地质动态预测算法,提升模型的自适应能力与抗干扰能力,经过多轮迭代优化,模型各项性能指标均达到预设要求,验证了构建的协同控制模型的可行性与优越性,可满足井下智能化采煤协同控制需求。

结束语

采煤机与液压支架协同控制技术是智能化采煤的关键,关乎煤炭开采的安全、高效与智能化,突破传统技术短板对行业高质量发展意义重大。本文深入研究了该技术,梳理理论及关键技术体系,重点探究多源信息感知等核心技术,创新设计融合地质动态感知的自适应协同控制策略,构建模型并仿真验证。因此,优化技术能提升协同精度与速度,适配井下环境。未来可结合前沿技术完善模型、优化算法,推动多设备协同,拓展应用场景,助力煤炭行业全流程智能化转型。

参考文献

- [1]韩小冰.智能化采煤作业中的关键技术——采煤机与液压支架协同控制技术研究[J].能源与节能,2026(1):41-44,48.
- [2]李德均,魏秀标,孙计云.基于5G与人工智能融合的煤矿智能化采煤系统关键技术研究[J].中国高新技术,2025(5):13-15.
- [3]张迪.智能化采煤机的关键技术及应用探讨[J].机械工业标准化与质量,2024(7):51-54.
- [4]宋柱.智能感知与决策在智能化采煤系统中的关键技术探讨[J].内蒙古煤炭经济,2025(2):17-19.