

煤矿综采工作面智能化开采设备协同控制效能提升研究

孙泽锋

国能能源集团宁夏煤业有限公司 宁夏银川 750000

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14663

[摘要] 针对煤矿综采工作面智能化开采中设备协同控制效能不足的问题,分析了当前发展现状与主要技术瓶颈,提出基于数据融合与智能调度的优化策略,并探讨其在复杂工况下的应用效果及未来发展趋势。研究表明,构建统一的数据管理平台与智能控制模型,有助于提升系统的响应速度、联动精度与运行稳定性。随着边缘计算、人工智能与工业互联网的深度融合,设备协同控制正逐步迈向更高效、更智能的新阶段,为煤矿智能化建设提供关键技术支持。

[关键词] 煤矿综采; 智能化开采; 协同控制; 数据融合; 设备调度

引言

煤矿智能化已成为推动行业转型升级的重要方向,综采工作面作为核心生产单元,其设备协同控制水平直接影响整体运行效率与安全保障能力。近年来,尽管液压支架、采煤机、刮板输送机等关键设备实现了局部自动化,但多设备之间的协同仍存在信息交互不畅、控制响应滞后等问题,限制了系统整体性能的发挥。在此背景下,探索提升设备协同控制效能的技术路径,成为实现高效、安全、智能开采的关键所在,具有重要的现实意义和应用价值。

一、煤矿综采工作面智能化设备协同控制的发展现状

近年来,国家持续推进煤炭行业智能化转型政策,推动了智能感知、自动控制、数据通信等技术在煤矿生产中的广泛应用,为综采工作面设备协同控制的发展奠定了坚实基础。目前,煤矿综采工作面已逐步形成以液压支架、采煤机、刮板输送机为核心的“三机”协同作业体系,并逐步引入远程监控系统、自动化控制系统及数据采集与监视控制系统(SCADA),实现了对关键设备运行状态的实时监测与基本联动控制。在此基础上,部分先进矿区开始试点基于工业以太网和5G通信的多设备协同平台,构建起统一的数据交互架构,提升了设备之间的信息共享能力与响应效率。

与此协同控制算法也在不断演进。传统基于PLC的逻辑控制方式正逐步被具有自适应能力的智能控制策略所替代,如模糊控制、神经网络控制、模型预测控制等方法已在部分场景中得到应用。这些控制策略能够根据工作面动态变化调整设备运行参数,从而提升系统的整体协调性和稳定性。此外,数字孪生技术的应用也为设备协同提供了新的思路,通

过虚拟仿真与物理设备的同步映射,进一步增强了协同控制的可视化与预测性。

在系统集成方面,越来越多的煤矿企业采用模块化设计理念,将各类传感器、执行器与控制器进行标准化接入,提高了设备间的兼容性与可扩展性。边缘计算与云计算技术的结合,使得现场数据能够在本地快速处理并上传至云端进行集中分析,有效提升了协同控制系统的反应速度与决策精度。尽管如此,当前煤矿综采工作面智能化设备协同控制仍处于发展阶段,存在系统开放性不足、多源异构数据融合难度大、控制策略适应性有限等问题,制约了其在复杂工况下的广泛应用。

二、设备协同控制中存在的 key 问题与技术瓶颈

在煤矿综采工作面智能化发展的推进过程中,尽管设备协同控制已取得一定成效,但在实际应用中仍面临诸多关键性问题和关键技术瓶颈,严重制约了系统整体效能的提升。这些问题既涉及硬件层面的兼容性与稳定性,也涵盖软件层面的数据处理能力与智能决策水平。当前,综采工作面所部署的各类设备来自不同厂商,其通信协议、接口标准及数据格式存在较大差异,导致设备间信息交互困难,形成事实上的“信息孤岛”。这种异构性不仅影响了多设备之间的实时联动,也增加了系统集成与维护的复杂度,限制了协同控制系统的扩展性和灵活性。部分老旧矿区仍采用传统的串行通信方式,难以满足现代协同控制系统对高带宽、低延迟的通信需求,进一步削弱了系统的响应能力。

在数据处理方面,综采设备运行过程中产生的数据具有多源性、时变性和非线性特征,如何实现对这些数据的高效

融合与实时分析成为一大挑战。现有的协同控制系统普遍缺乏统一的数据管理平台,无法有效整合来自采煤机、液压支架、刮板输送机等关键设备的状态参数,从而影响协同控制策略的生成与执行精度。此外,由于井下环境复杂,传感器采集的数据往往受到噪声干扰,导致系统误判或漏判的情况频发,降低了协同控制的可靠性。控制算法的适应性不足也是制约设备协同效能提升的重要因素之一。目前多数综采工作面仍采用基于固定规则的控制逻辑,面对工作面地质条件变化、设备磨损老化等动态因素时,系统调整滞后,难以实现自适应协同。虽然已有研究尝试引入人工智能算法进行优化,但在模型训练数据获取、实时推理效率以及算法鲁棒性等方面仍存在明显短板,尚未形成成熟稳定的工程化解决方案。

设备协同控制系统在安全防护方面仍存在明显短板。随着远程控制与自动化水平提升,系统面临的数据篡改、非法访问及恶意攻击等网络安全风险持续上升,现有身份认证、数据加密与访问控制机制尚不健全,难以有效抵御潜在威胁,一旦遭受攻击,可能造成设备失控甚至引发安全事故,严重影响矿井运行安全。运维保障体系不够完善,井下复杂环境导致设备故障率较高,但当前系统普遍缺乏高效的故障预测与诊断能力,难以及时识别隐患,延长了设备停机时间,影响综采作业连续性。专业运维力量薄弱,维护方式依赖经验判断,缺乏科学化支撑,进一步制约了系统的稳定运行。

三、基于数据融合与智能调度的协同控制优化策略

为应对煤矿综采工作面设备协同控制中存在的信息交互不畅、响应滞后及控制逻辑僵化等问题,亟需构建以数据融合与智能调度为核心的优化控制策略,提升系统整体运行效率与动态适应能力。该策略依托先进的传感技术、边缘计算平台和人工智能算法,实现对多源异构数据的实时采集、统一处理与智能决策,从而增强设备之间的联动性与协同精度。在数据采集层面,通过部署高精度传感器与智能终端,对液压支架位姿、采煤机运行状态、刮板输送机负载变化等关键参数进行持续监测,形成完整的设备运行数据链。这些数据不仅涵盖设备自身的物理状态,还包含环境参数如地质构造变化、瓦斯浓度波动等,为后续协同控制提供全面的信息支撑。为进一步提高数据质量,系统引入噪声滤波、异常值识别与补偿机制,确保所采集数据具有较高的准确性和稳定性。

在数据融合方面,采用多源信息融合架构,将来自不同设备和传感器的数据进行归一化处理,并通过时间同步与空间对齐技术消除数据间的异步性与偏差。利用特征提取与数据压缩方法,降低冗余信息对通信带宽的占用,同时保留对协同控制具有指导意义的关键特征。在此基础上,构建统一的数据管理平台,实现设备状态的可视化呈现与历史数据的存储调用,为控制策略的生成提供数据基础。在控制策略设计上,引入基于模型预测的动态调度机制,结合当前工况与历史运行规律,对未来一段时间内各设备的协同动作进行预判与规划。通过建立设备行为关联模型,分析不同设备之间的耦合关系与影响权重,制定合理的优先级调度规则,避免因单一设备异常而引发整个系统停摆。应用强化学习与深度神经网络等智能算法,使控制系统具备自学习与自适应能力,能够根据现场条件变化动态调整控制参数,提升系统的灵活性与鲁棒性。

在执行层面上,协同控制系统通过边缘计算节点完成本地快速决策,并借助工业互联网将关键指令分发至各执行单元,确保控制命令的低延迟传递与高可靠性执行。对于复杂场景下的突发状况,如地质突变或设备故障,系统可自动切换至应急控制模式,通过调整相邻设备的工作状态来维持整体作业流程的连续性,减少非计划停机时间。在安全防护与运维保障方面,优化策略中嵌入了访问控制机制与入侵检测模块,防止非法操作和恶意攻击对协同控制过程造成干扰。

四、复杂工况下协同控制策略的应用效果分析

在煤矿综采工作面的实际运行过程中,地质条件多变、设备状态动态波动以及环境干扰因素频发,构成了复杂的工况背景。在此背景下,协同控制策略的实施效果不仅直接影响设备之间的联动效率,还关系到整个工作面的稳定运行与安全生产水平。针对复杂工况下的协同控制策略进行系统性分析,是评估其实际应用价值的重要环节。在应对地质构造变化方面,协同控制系统通过实时采集采煤机截割阻力、液压支架支撑力及刮板输送机负载等参数,结合数据融合技术对当前地质状况进行动态识别。基于此,控制系统可自动调整各设备的工作节奏与运行参数,确保采煤作业在断层、夹矸或倾角变化区域仍能保持连续性和稳定性。这种自适应能力有效降低了因地质突变引发的设备冲突和停机风险,提升了整体作业效率。

面对设备状态的不确定性, 协同控制策略引入了设备健康状态评估机制, 通过对关键部件振动、温度、磨损等指标的持续监测, 预测设备性能衰减趋势, 并据此优化调度方案。例如, 在某一设备出现轻微故障征兆时, 系统能够及时调整其与其他设备之间的协作顺序, 避免故障扩大化, 同时维持生产流程的连贯性。这种动态调度方式显著提高了系统的容错能力和运行可靠性。在环境干扰较强的条件下, 如高湿度、强粉尘、电磁干扰等复杂井下环境中, 协同控制系统的通信稳定性面临严峻考验。为此, 采用冗余通信通道与抗干扰编码技术, 提升数据传输的完整性与时效性。利用边缘计算节点对本地数据进行预处理, 减少对中心控制单元的依赖, 从而降低通信延迟, 保障控制指令的快速下达与执行。

协同控制策略在突发工况下具备快速切换控制模式的能力。当监测到瓦斯浓度异常、设备过载或液压压力偏离正常范围等危险情况时, 系统可即时启动应急联动机制, 协调相关设备进入保护状态或调整至安全运行区间, 有效防止事故扩大, 保障作业安全。在多任务并行场景中, 通过智能调度算法优化设备动作序列, 合理分配资源, 避免因任务冲突造成的效率下降与能耗增加。系统依据优先级与实时反馈动态调整设备启停时机和运行参数, 提升资源利用效率。实际应用表明, 该策略在复杂环境下表现出较强的适应性与稳定性, 增强了综采工作面的协同效能与运行韧性, 为煤矿智能化开采提供了坚实的技术支撑。

五、设备协同控制技术的智能化发展趋势

在系统架构层面, 传统集中式控制模式正在被分布式智能协同架构所取代。新一代协同控制系统依托边缘计算节点实现本地数据处理与快速响应, 同时通过云端平台完成全局调度与策略优化, 构建起“端一边一云”一体化的控制体系。这种架构既提升了系统的实时性与灵活性, 又增强了对复杂场景的适应能力, 为多设备高效协同提供了坚实的技术支撑。通信技术的进步也为设备协同控制带来了新的变革。5G 网络的大带宽、低时延特性使设备间的数据传输更加稳定可靠, 支持大规模并发连接和高精度同步控制。时间敏感网络(TSN)等新型工业通信协议的应用, 进一步提高了控制指令的传输效率与准确性, 确保了不同设备在动态环境下的协调一致性。

在控制方法上, 传统的基于规则的逻辑控制正在向以人工智能为核心的自学习、自适应控制转变。深度强化学习、

联邦学习等新兴算法被引入协同控制模型中, 使系统具备根据历史数据和实时反馈不断优化控制策略的能力。这种基于数据驱动的控制方式能够有效应对地质条件变化、设备老化等不确定因素, 提升系统整体的智能水平和运行稳定性。数字孪生技术的应用标志着协同控制迈向虚实结合的新阶段, 通过构建综采工作面的虚拟镜像, 实现物理设备与数字模型的实时交互, 支持协同策略仿真验证及实际运行中的预测性维护与故障模拟, 增强了系统的预见性和可控性。

安全防护机制向智能化发展, 集成行为识别、异常检测与自动隔离等智能模块, 利用机器学习分析通信行为特征, 及时发现并阻断潜在攻击路径, 提升系统安全性。运维管理方面, 系统具备自我诊断与辅助决策能力, 通过长期数据分析自动生成健康评估报告和维护建议, 推动运维模式由被动响应转为主动干预, 降低人工干预频率, 提高设备全生命周期管理效率。

结语

煤矿综采工作面智能化设备协同控制的发展, 正经历从基础自动化向深度智能协同的转变。通过数据融合、边缘计算与人工智能等技术的引入, 系统在复杂工况下的响应能力、调度效率与运行稳定性得到显著提升。面对当前存在的信息孤岛、算法适应性不足与安全防护薄弱等问题, 技术演进正朝着分布式架构、自学习控制与数字孪生方向深入推进。未来, 随着通信、感知与决策技术的进一步突破, 设备协同控制将实现更高水平的自主协同, 为煤炭行业的高质量发展提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1] 陈志刚. 基于物联网的煤矿综采工作面智能控制系统研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49 (5): 67-72.
- [2] 刘志强, 王海峰. 多源异构数据融合在矿山设备协同中的应用进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50 (10): 112-118.
- [3] 高明远. 煤矿智能综采系统中设备联动控制策略探讨[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48 (6): 88-93.
- [4] 赵文彬. 智能化综采工作面协同控制平台架构设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43 (2): 45-50.
- [5] 黄晓东. 基于边缘计算的煤矿设备实时协同控制研究[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59 (14): 210-216.