

综采工作面机电成套装备智能协同控制技术研究与实践

——以柳巷煤矿30112大采高综放工作面为例

刘 群

湖南楚湘建设工程集团有限公司 湖南 长沙 410114

摘 要：本文基于柳巷煤矿30112大采高综放工作面工程背景，构建了“感知—传输—边缘集控—数字孪生—地面决策”五级智能协同控制体系。重点攻克了多源状态全域感知、采煤机—液压支架—刮板输送机三机自适应联动、液压支架群组协同支护、煤流负荷均衡调控及设备故障超前预判五大核心技术，形成了成套机电装备闭环协同控制逻辑。现场12个月连续运行表明：系统实现了工作面常态化少人化开采，单循环作业时间缩短16.8%，设备月度故障停机时长下降42%，工作面支护直线度误差控制在±50 mm以内，吨煤综合电耗降低11.3%，全面提升了开采效率、设备可靠性与本质安全水平。研究成果可为同类矿井综采工作面智能化升级提供系统化工程参考。

关键词：综采工作面；机电成套装备；三机联动；智能协同控制；数字孪生

引言：智慧矿山规模化落地背景下，综采成套装备协同性能是智能化开采核心评判标准。传统三机分设独立控制系统，仅靠简单硬接点单向联锁，缺少实时数据互通与协同调控，无法随煤层、顶板、煤流工况自适应匹配参数，常发生压溜、丢顶、设备过载等故障，现场配套多岗位作业人员，用工成本与设备近距作业安全隐患双重突出。

当前一体化智能协同控制技术借助物联网、边缘计算、机器视觉、数字孪生打通设备数据通道，实现采、支、运、供液全流程联动。本文以柳巷煤矿30112大采高综放面为实例，介绍协同控制架构、核心工艺、施工流程与应用效果，为同类矿井智能改造提供实践参考^[1]。

1 工作面概况与问题分析

1.1 工作面基础条件

柳巷煤矿30112工作面位于一水平301盘区，为近水平稳定煤层，可采走向长度1491 m，倾向长度196 m，平均煤厚10.5 m，可采储量344.28万t。采用走向长壁综合机械化放顶煤采煤法，全部垮落法管理顶板。机采高度5 m，放顶煤高度5.5 m，采放比1：1.1，割煤与放煤步距均为0.8 m。

工作面配套主要机电装备见表1。

表1 30112综放工作面主要机电设备配置

序号	设备名称	型号	数量	生产厂家
1	交流电牵引采煤机	MG900/2495-WD型	1台	郑州煤机智能工作面科技有限公司
2	放顶煤过渡支架	ZFG18600/29.5/50D型	7架	郑州煤矿机械集团股份有限公司

续表：

序号	设备名称	型号	数量	生产厂家
3	掩护式放顶煤液压支架	ZFY18000/29/55D型	90架	郑州煤矿机械集团股份有限公司
4	端头支架	ZTZ20000/25/50D型	1架	郑州煤矿机械集团股份有限公司
5	运顺超前支架	ZQL10000/25/50D型	2组	郑州煤矿机械集团股份有限公司
6	回顺超前支架	ZQL12800/25/50D型	3组	郑州煤矿机械集团股份有限公司
7	中双链前部刮板输送机	SGZ1000/2000型	1部	宁夏天地奔牛实业集团有限公司
8	转载机	SZZ1350/700型	1部	宁夏天地奔牛实业集团有限公司
9	破碎机	PLM5000型	1部	宁夏天地奔牛实业集团有限公司
10	中双链后部刮板输送机	SGZ1200/2000型	1部	中煤张家口煤矿机械有限责任公司
11	运输顺槽胶带输送机	DTL120/200/2×400型	1部	原平市兴胜机械制造有限公司
12	乳化液泵站（三泵两箱）	BRW630/37.5型	3台	浙江中煤机械科技有限公司
13	喷雾泵站（两泵一箱）	BPW800/16型	2台	浙江中煤机械科技有限公司
14	综放工作面自动化控制系统	ZE0704	1套	郑州恒达智控科技股份有限公司

设备信息孤岛严重。采煤机、液压支架、泵站及输送机采用不同厂商的控制系统，通信协议不统一，数据无法互通。设备间仅能实现简单的启停联锁，缺乏动态参数交互与协同优化能力。

联动响应滞后，工况适配性差。采煤机行走速度与

截割参数无法与支架跟机移架、刮板机链速实时匹配。在薄煤段,采煤机高速截割易造成输送机空载运行;在厚煤段,负载骤增又易引发电机过载及链条卡滞,严重影响设备寿命与生产效率^[2]。

支护控制粗放,直线度偏差大。单架液压支架独立动作,缺乏群组协同逻辑,导致工作面推进直线度偏差大,局部顶板支护阻力不足,片帮、漏顶隐患频发。故障处置滞后,非计划停机频次高。

设备运行状态依赖人工巡检判断,无在线监测与预判机制。突发故障导致长时间停产,对正常生产秩序影响显著。

岗位人员密集,安全风险突出。工作面需配置采煤机司机、支架工、三机维护工等6名现场操作人员,人员近距离接触运转设备,机械伤害与顶板事故风险较高。

2 智能协同控制系统整体架构

2.1 设备感知层

布设全域多源感知装置实时采集设备与环境数据:采煤机搭载定位、摄像、振动、电机传感监测位置、采高、负载;每台支架配备压力、行程、倾角、视觉设备监控支护状态;输送机、泵站配套转矩、张力、流量传感,辅以煤流视觉;另布设摄像、顶板、瓦斯传感器采集环境安全信息。

2.2 高速传输网络层

采用工业光纤双环网与本质安全型无线基站混合组网,统一基于Ethernet/IP的工业实时以太网协议。所有机电控制器及传感器数据均接入井下环网,有线传输速率不低于1000 Mbps,无线传输速率不低于100 Mbps,数据传输延迟控制在20 ms以内,满足协同控制毫秒级联动要求。同时配置网络冗余切换机制,单链路故障时可自动切换,确保控制指令不中断^[3]。

2.3 井下边缘协同集控层

部署井下防爆集控平台,作为成套装备协同控制的核心决策单元。该平台搭载高性能边缘计算控制器,内置协同控制算法模型,具备本地自主决策能力,不依赖地面服务器:统一接入采煤机电控、支架电液控、三机变频器及泵站控制器,完成多源异构数据的标准化解析与融合处理;

内置三机联动、群组支架协同、煤流均衡及故障预判四大控制模型,根据实时数据下发协同动作指令;

采用“三用一备”冗余控制终端配置,主控制器故障时可在毫秒级切换至备用设备,杜绝因控制器失效导致的工作面失控停机^[4]。

2.4 数字孪生仿真层

基于工作面三维地质模型与设备数字模型,搭建虚实映射的数字孪生平台,实时同步所有机电装备的位姿与运行参数:

动态模拟采煤机截割轨迹、支架移架顺序及刮板机煤流分布,提前预判设备干涉、负载突变等潜在风险;

对协同控制参数进行仿真验证,优化采煤速度、跟机距离及输送机转速的匹配逻辑,将最优参数下发至边缘控制器执行;

存储全周期装备运行数据库,为算法迭代更新与故障回溯分析提供数据支撑。

2.5 地面远程决策层

地面智能调度中心承担宏观管控职能:实时监控工作面成套装备整体运行状态、产量及能耗;远程下发开采工艺参数与协同控制策略;调取历史数据开展月度效率、故障及能耗统计分析;具备远程干预控制权限,紧急工况下可一键闭锁全部设备,确保安全。

3 成套装备智能协同核心控制技术

3.1 采煤机—液压支架—刮板输送机三机自适应联动技术

以采煤机实时坐标为基准搭建动态联动数学模型,精准匹配割煤、移架、运煤工序时序与运行参数。系统结合采煤机速度、顶板压力自适应调控跟机移架,破碎顶板缩短滞后距离、提高初撑力,平缓煤层拉大间距节约能耗;融合输送机转矩、机器视觉测算煤流,自动调节采煤机牵引与刮板机转速,规避压溜断链;设置多重安全闭锁,前方10m未护帮则限速,输送机停机即刻闭锁采煤机牵引,形成完整安全联动闭环^[5]。

3.2 液压支架群组自组织协同支护控制

针对传统单架独立控制导致工作面直线度偏差大的问题,本文采用分布式群组协同算法:

相邻支架实时共享姿态与压力数据,系统统一修正推移千斤顶行程,将工作面整体直线度误差稳定控制在 ± 50 mm以内;

实施分段差异化支护策略:工作面中部高矿压区域自动提升支架工作阻力,两端端头支架延长护帮保持时间,实现围岩控制精细化;

智能放煤协同控制:后部刮板机配套煤矸识别摄像仪,当识别出含矸率超标时,系统自动关闭对应支架的放煤口,有效降低原煤中的矸石混入率。

3.3 乳化液泵站协同供液调控技术

泵站与支架电液控制系统实现数据互通,基于按需供液原则实现节能运行:

根据工作面同时动作支架数量及移架动作类型,动态

调整泵站开启台数和输出流量。多架同步移架时满负荷供液,仅少量支架微调姿态时切换至单泵低流量运行;

实时监测液压油温及过滤器压差,油温超标时自动启动冷却系统,过滤器压差达到预警值时推送维护提醒,实现预防性维护。

3.4 多设备联合故障预判与协同保护

融合振动、温度、电流及压力等多维监测数据,建立机电装备典型故障特征库,依托边缘计算实现故障超前预警:

针对采煤机截割部轴承、刮板机减速器及泵站电机等易损部件,可提前5~8 h预判磨损、过热等早期故障并推送检修提醒;

当单台设备出现异常工况时,系统协同关联设备自动调整运行负荷,防止故障扩大;当识别重大故障风险时,系统分级声光报警,必要时自动停机以保护成套装备。

4 现场实施流程与应用效果

4.1 系统落地实施步骤开展设备通信升级

统一各机电控制器通信协议,增设数据转换模块,搭建井下双环传输网络,完成各类传感设备布设与校准。井下布设防爆集控操作台,录入设备参数、地质模型,调试数字孪生系统实现虚实同步。现场实测完整走刀数据,训练三机联动、支架协同控制模型,分空载、轻载、满载工况调试优化联动程序。采用分阶段试运转方式,先单机智能调控,再局部三机联动,最后实现整套设备全自动协同,完善安全闭锁与远程操控功能。同步完成岗位调整,原有操作工转为巡检集控人员,配套出台智能工作面巡检、参数调整、故障处置相关管理细则。

4.2 实际应用效果

该系统在柳巷煤矿30112工作面连续稳定运行12个月,各项指标显著优化:

开采效率明显提升。单循环作业时间由28 min缩短至23.3 min,缩短16.8%;工作面日产量提高12.5%。

设备可靠性显著增强。机电设备月度故障停机时长下降42%,刮板机压溜、支架支护不到位等常见故障大幅减少。

减人效果突出。工作面现场操作人员由6人减少至2名巡检人员,主要操作转移至井下集控室与地面调度中心,有效降低了人员井下高危作业时长。

安全管控水平升级。装备联动安全闭锁实现全覆盖,人员闯入采煤机危险区域时自动限速闭锁,全年未发生机电及顶板轻伤及以上事故。

节能降耗成效显著。通过按需协同调速与泵站节能供液,工作面吨煤综合电耗降低11.3%,液压油损耗降低17%。

支护质量标准化达标。工作面推进直线度稳定控制在设计偏差范围内,顶板漏顶、片帮隐患频次下降65%。

5 存在问题与后续优化方向

复杂地质条件适应性有待增强。在断层、褶曲等复杂构造区域,煤岩识别精度有所下降。后续计划融合雷达地质探测数据,优化采煤机自适应截割算法,提升极端工况下的协同适配能力。

装备全生命周期协同管理尚需完善。当前系统侧重于运行过程控制,下一步拟接入设备备件管理与检修台账,构建“控制—运维”一体化协同管理模块。

AI自主优化能力有待提升。后续将引入强化学习算法,基于每日开采数据自动修正协同控制参数,进一步减少人工调试工作量,实现控制策略的持续迭代升级。

结束语

本次研究搭建五级综采成套装备智能协同控制体系,打通采煤、支护、运输、供液各设备的数据传输通道。依托三机自适应联动、支架群组同步调控、煤流平衡管控、设备提前预警防护等关键技术,克服传统单独控制存在的配合滞后、开采效率偏低、现场安全隐患突出等长期存在的行业问题。

柳巷煤矿30112工作面实际应用证明,该系统能够实现工作面减人增效智能化开采,在生产速度、设备稳定运行、井下作业安全、能耗管控上均取得良好效果,适合中厚煤层综采工作面智能化改造推广。煤矿智能化发展必须落实各类机电设备深度协同,充分发挥成套智能设备综合作用,助力煤炭产业安全高效绿色转型。

参考文献

- [1] 王国法. 煤矿智能化技术体系与发展路径[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-14.
- [2] 闫汝瑜, 李明忠. 450 m超长工作面全链条智能化系统构建与应用[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(5): 1-17.
- [3] 杨梁, 折海生. 综采工作面智能一体化平台研究与应用[J]. 中国煤炭, 2026, 52(5): 68-73.
- [4] 陈丽. 面向智能矿山的综采工作面机电设备协同控制策略研究[J]. 工程技术研究, 2025, 10(24): 78-81.
- [5] 马保林. 大采高综采三机联动智能控制关键技术[J]. 煤矿机电, 2023, 44(9): 36-40.