

煤矿综采机电设备远程集控与无人值守技术实践

袁 浩

国家能源集团神东保德煤矿 山西 忻州 036600

摘 要：本文系统梳理了综采设备远程集控的系统架构及关键技术，包括多源感知与数据融合、高可靠网络传输、设备智能联动控制、视频监控与镜像映射、故障诊断与预测性维护等核心模块，着重分析了从单机自动化到系统智能化、从有人巡视到少人乃至无人值守的递进路径。针对实践中暴露的网络可靠性、设备适配性、数据安全及运维模式转型等共性难题，提出涵盖技术标准、管理流程和人才建设的综合优化策略，为煤矿智能化开采的工程实施提供参考。

关键词：煤矿综采；远程集控；无人值守；智能开采；机电设备

引言

煤炭作为我国基础能源，其安全高效开采至关重要。综采工作面是煤矿生产核心，集成采煤机、输送机、液压支架等多类机电设备，需严格时序与空间协同。传统模式依赖人工就地操作，人员长期暴露于煤尘、噪声、瓦斯等高危环境，且协同效率低、异常响应滞后。随着智能化政策推进，远程集控与无人值守成为升级关键方向，其本质是以“数据驱动决策、系统自主运行”替代“人工盯防”，将控制权上移至地面调度中心，实现井下少人化乃至无人化，显著提升安全与效率。本文从系统构成、关键技术、实施路径及现实挑战等方面系统分析，旨在勾勒综采远程集控与无人值守的技术全貌，为行业提供清晰的认知框架。

1 远程集控与无人值守的系统架构

1.1 总体逻辑架构

综采机电设备远程集控系统通常采用“感知-传输-决策-执行”四层逻辑架构。感知层由部署在各类设备及采场环境中的传感器群构成，负责采集设备工况参数、位置姿态、电压电流、温度振动以及瓦斯浓度、粉尘浓度等环境数据。传输层依托井下工业以太环网、5G/Wi-Fi 等通信网络，将感知数据可靠上传，并将控制指令下行送达现场执行单元。决策层位于地面或井下中心集控室，由数据服务器、工控机、视频拼接墙及智能分析平台组成，承担数据融合、状态评估、协同决策和人机交互功能。执行层为设备本体控制器或执行机构，接收集控中心的调度指令并完成启停、调速、移架、推溜等具体动作。四层之间通过标准通信协议和时间同步机制紧密衔接，形成从数据采集到控制执行的闭环回路。

1.2 物理部署与功能分区

从物理空间看，远程集控系统划分为地面集控中心、井下集控站和现场设备三层。地面集控中心作为远程操作的主阵地，配备大屏显示系统、操作台、语音调度系统及冗余服务器，操作员在此可同时监控多个工作面的设备状态，必要时通过手柄或按键进行远程干预。井下集控站设在运输巷或设备列车区域，作为地面与现场的中继节点，在通信中断时可降级为独立控制模式，确保基本生产不中断。现场设备层包括采煤机、支架电液控系统、三机驱动部及泵站等，均配置具备通信接口的智能控制器，支持远程启动、参数修改和故障自检。典型的物理部署强调冗余设计和故障隔离，任何单一环节失效均不应导致系统全面瘫痪。

2 关键技术支持体系

2.1 多源感知与数据融合技术

准确感知是远程控制的前提。综采工作面需监测的物理量包括采煤机截割电流、牵引速度、摇臂角度及左右滚筒高度；刮板输送机机电电流、转矩、链条张力及减速器温升；液压支架立柱压力、推移行程、姿态倾角及遥控操作指令；泵站出口压力、液位、乳化液浓度及过滤器压差；带式输送机带速、跑偏、堆煤及纵撕保护状态。此外，还需获取工作面全景视频、采煤机位置轨迹、瓦斯及 CO 浓度、粉尘浓度等环境参数^[1]。上述信号来源多样、格式各异，需通过边缘计算节点进行数据清洗、时间校准和特征提取，形成统一的设备状态向量。数据融合不仅服务于实时监控，更为后续智能决策提供结构化数据基础。

2.2 高可靠通信与同步网络

井下通信环境的特殊性在于空间受限、电磁干扰严重、防爆要求苛刻。远程集控系统对通信网络提出了低延时（端到端 $\leq 100\text{ms}$ ）、高带宽（上行视频流需 $\geq 100\text{Mbps}$ ）、高可靠（年可用率 $\geq 99.99\%$ ）的苛刻要求。当前主流方案采用“工业以太环网+5G+Wi-Fi”混合组网：主干环网连接各采区和主要巷道，确保数据传输的物理冗余；工作面内部署 5G 基站或 Wi-Fi6AP，覆盖采煤机、支架控制器及移动巡检装置。为确保控制指令的确定性传输，需引入时间敏感网络（TSN）或工业实时以太网（PROFINET/EtherNet/IP）技术，实现时间同步和带宽预留。通信链路应采用双路冗余热备，一旦主链路中断，备用链路应在毫秒级完成切换且不影响正在执行的控制流程。

2.3 设备智能联动控制算法

综采工艺的“采-支-运”三机协同是远程集控的核心难点。采煤机沿工作面往返截割时，液压支架需跟随其位置自动完成伸收护帮、降柱、移架、升柱和推溜动作，刮板输送机则需根据采煤机牵引速度和截割负载动态调整链速^[2]。智能联动控制算法基于采煤机绝对位置编码器实时定位，结合预先设定的工艺段参数（如斜切进刀段、正常截割段、清浮煤段），自动生成各设备的动作序列和时序参数。PID 调节、模糊控制及模型预测控制用于电机转速和液压系统的精确闭环调节。值得强调的是，联动控制不是刚性时序表，而应具备自适应能力——当某设备负载异常升高时，系统自动降速或暂停上游设备，待负载回落后再恢复，防止卡堵和过载损坏。

2.4 视频监控与虚拟镜像

视频监控是远程操作员判断井下现场状态的“眼睛”。工作面内部署防爆高清摄像机，覆盖采煤机滚筒、支架前探梁、转载机入口及输送机机头等关键观察点，视频流经编解码后上传集控中心拼接屏显示。为进一步提升态势感知能力，近年引入虚拟镜像技术——将采煤机位置、支架动作和输送机状态实时映射至三维数字模型中，操作员可在屏幕上以任意视角观察整个工作面的虚拟运行状态，并叠加实时数据标签（如电压、电流、压力）。数字镜像不仅服务于监控，还可用于模拟推演：操作员在虚拟环境中预演下一步操作指令，系统评估对相邻设备的影响后再下发执行，显著降低了误操作风险。

2.5 故障诊断与预测性维护

远程集控系统不再是单纯的控制执行工具，还应具备设备健康管理能力。基于振动频谱分析、油液在线监

测、温度趋势分析和电流谐波检测等手段，系统可识别轴承磨损、齿轮断裂、液压泄漏及绝缘老化等早期故障征兆。通过构建设备退化模型和剩余寿命预测算法，系统能够提前 2~4 周给出维护建议，并将维护计划嵌入生产调度系统，避免突发性停机。这一功能对于实现真正意义上的“无人值守”至关重要，因为无人意味着必须依赖系统自主感知异常并提前预警，而非等待现场人员发现。

3 无人值守的实现路径与运行机制

3.1 从单机远控到系统无人化的递进层次

综采无人化并非一蹴而就，需经历三个阶段递进。第一阶段是“单机遥控化”，各设备具备远程启停和调节功能，操作人员由井下移至顺槽集控室。第二阶段是“系统联动化”，采煤机、支架和三机实现自动协同，操作员主要担任“监盘”角色，仅在异常时介入。第三阶段为“无人值守”，工作面正常生产时段内无需人员入井，所有设备由地面集控中心统一调度，系统具备全流程自主运行能力，仅需定期安排巡检机器人或运维人员入井进行设备点检和故障处理^[3]。目前国内多数智能化示范工作面已进入第二阶段并向第三阶段迈进，真正的常态化无人值守仍在探索中，主要制约在于非结构化地质条件下的自适应割煤和突发故障的自主处置能力尚不成熟。

3.2 地面远程干预的操作规程与责任界定

在无人值守模式下，地面操作员的工作内容由“频繁操作”转变为“监督+按需干预”。应制定严格的远程操作规程：正常时段实行“三不干预”原则——设备运行平稳时不干预、系统自动决策未超阈值时不干预、工艺程序执行中不强行干预；异常时段按照“先停后问、确认再动”的规则操作——系统报警后自动暂停相关设备，操作员通过视频和数据分析判断原因，确认安全后方可远程复位或调整。责任界定上需明确：凡系统自动决策范围内的动作由集控系统和设备厂商承担设计缺陷责任，凡操作员超越系统建议的手动干预由操作员承担操作责任。这种权责划分有利于避免“系统依赖-人工推责”的管理真空。

3.3 安全冗余与应急处置机制

无人值守的最大疑虑是安全性。系统设计中应嵌入多重安全屏障：第一层为设备自身保护（过载、过压、超温、超速等硬保护，不可被远程旁路）；第二层为联锁保护（如输送机停止后采煤机自动停机、瓦斯超限工作面断电）；第三层为紧急停机机制——在地面集

控中心、井下集控站和现场关键位置均设置紧急停止按钮,任何一处触发均可实现全系统急停,且急停优先级最高,不可被远程覆盖。应急处置应建立“分级响应”预案:一级故障(通信中断、主控死机)自动转入井下集控站控制并通知值班人员;二级故障(设备重载报警、温升超标)触发语音提醒,操作员需在3分钟内确认;三级故障(环境参数越限)触发自动停机并启动撤人程序。所有应急操作均需进行事后复盘,持续优化系统响应逻辑。

3.4 采面环境智能监控与联动闭锁

无人值守对环境的依赖度远高于有人作业。系统需集成甲烷、一氧化碳、氧气、温度、风速、粉尘及水位等多参数监控,所有传感器信号均与集控系统联动闭锁。当甲烷浓度达到断电阈值(通常为 $0.8\%CH_4$)时,系统自动切断工作面所有非本安电源,并停止采煤机和运输机运转,同时维持通风和排水设备运行^[4]。风门开关状态、风筒压力及局部通风机运行参数也需纳入监控,确保无人期间通风系统可靠,杜绝瓦斯积聚风险。

4 实践挑战与优化对策

4.1 井下恶劣工况对设备可靠性的考验

井下高湿度、强震动、供电电压波动及煤尘积附严重威胁电子设备的长期稳定运行,传感器零点漂移、通信接头氧化腐蚀、视频镜头污染导致成像模糊等问题频发。应对策略包括:选择宽温($-20^{\circ}C\sim+60^{\circ}C$)、高防护等级(IP67及以上)的工业级硬件,易损件采用插拔式模块化设计便于快速更换,建立传感器定期标定和清洁维护制度,同时利用软件算法对漂移信号进行补偿修正。

4.2 多设备异构协议的互联互通障碍

不同厂商的采煤机、支架电液控、三机变频器采用各异的通信协议和数据结构,系统集成需要大量协议转换网关和定制开发,不仅增加成本而且降低可靠性。应积极推动煤炭行业统一的设备数据交互标准(如基于OPCUA或MQTT的语义规范),并在招标采购中明确要求设备开放标准通信接口,减少私有协议封锁。对于存量设备,采用边缘网关通过串口/现场总线采集数据并转换为统一格式上云。

4.3 网络安全风险与防护策略

随着远程集控系统与矿井办公网络甚至互联网的互联互通,网络攻击面显著扩大。一旦控制系统被入侵,

可能造成设备误动作甚至重大安全事故。应采用物理隔离+逻辑隔离相结合的安全策略:生产控制网络与管理信息网络之间部署单向网闸,只允许监测数据向外传输,控制指令必须通过专用的安全认证通道下发。实施工业防火墙、入侵检测、白名单访问控制及操作员双因素认证,定期开展渗透测试和安全审计,构建纵深防御体系。

4.4 运维管理模式与人员技能转型

无人值守不意味着放弃维护,恰恰对维护水平提出了更高要求。设备维护由“日常检查+故障抢修”转变为“数据分析+预测性维护+快速响应”,维修人员需要掌握通信调试、软件配置、数据分析等新技能。企业应建立“机电+信息化”复合型培训体系,选拔优秀技术人员参加智能化系统专项培训,同时与设备厂商签订技术服务协议,在初期阶段提供远程诊断支持和现场技术保障,逐步过渡为自主运维。

5 结语

煤矿综采机电设备的远程集控与无人值守是煤炭智能化的关键方向。当前,远程集控已具备推广基础,但常态化无人值守仍需突破设备自主决策、通信可靠性及复杂地质适应性等瓶颈。其技术逻辑在于以全面感知、智能决策、精准执行和预知维护分别替代人的观察、判断、操作与巡检。需明确的是,无人值守并非“无人负责”,而是管理重心由井下转向地面数据空间,对系统设计、运维与应急提出更高要求。未来应重点推进三项工作:建立统一跨厂商数据标准,打破信息孤岛;完善远程集控法规与技术规范,界定安全边界;加强AI驱动的煤岩识别、自主截割等核心算法研发,提升地质自适应能力。唯有技术、管理、人才与标准协同发力,方能实现综采工作面安全、高效、常态化的无人运行,推动煤炭工业高质量发展。

参考文献

- [1] 王国法,刘峰,孟祥军.煤矿智能化建设技术体系与发展路径[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.
- [2] 张良,李首滨,黄曾华.综采工作面智能集控系统关键技术研究[J].工矿自动化,2022,48(5):1-8.
- [3] 毛善君,陈华辉,李梅.基于数字孪生的综采工作面远程监控技术[J].煤炭科学技术,2023,51(3):126-135.
- [4] 孙继平,范京道.煤矿5G通信系统与智能化应用[J].煤炭学报,2021,46(8):2415-2424.