

煤矿井下无人化掘进工作面供电与控制系统集成设计

安学忠 吴建平

山东新陶阳矿业有限责任公司 山东 泰安 肥城 271624

【摘要】：煤矿井下无人化掘进对供电可靠性与控制协同水平提出更高要求，传统分散式系统结构已难以满足连续、高效作业需求。围绕无人化掘进工作面运行特征，构建供电与控制一体化集成架构，优化电源分配方式与负载匹配机制，融合远程监测、自动控制与数据通信技术，实现设备群协同联动与实时状态感知。通过安全冗余设计与故障自诊断机制，提高系统抗干扰能力与运行稳定性，降低人工干预频率。实践分析表明，一体化集成方案能够提升掘进效率与供电质量，为井下智能化建设提供系统化技术路径。

【关键词】：煤矿井下；无人化掘进；供电系统；控制系统；集成设计

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.020

引言

煤矿开采逐步迈向智能化阶段，掘进工作面成为技术升级的关键环节。井下空间狭窄、环境复杂，设备运行连续性与安全稳定性直接关系到生产效率。无人化掘进模式对供电保障能力和控制协同精度提出更高标准，传统供电与控制分离结构难以实现高效联动，系统响应滞后、信息孤立等问题逐渐显现。构建集成化供电与控制体系，形成统一架构与协同运行机制，成为推动井下掘进装备智能升级的重要方向。围绕系统结构优化与功能融合展开深入探讨，有助于提升工作面整体运行水平。

1 井下无人化掘进工作面系统需求分析

1.1 无人化掘进作业运行特征

无人化掘进工作面以掘进机为核心，联动转载、运输、支护及通风等成套设备构成连续作业系统，运行过程呈现高负载、强耦合、节奏连续的特点。设备启停频繁，电机冲击电流与机械振动交织叠加，对系统动态响应能力提出更高标准。井下环境存在粉尘、潮湿与电磁干扰等因素，要求控制信号传输具备抗干扰能力与实时性。远程操控模式下，作业状态感知依赖多源传感器与视频监测，实现掘进姿态、截割负荷与设备温升的在线反馈，形成闭环调节机制，确保设备群协同运行稳定。

1.2 供电系统稳定性要求

高功率截割电机与液压系统对电压波动敏感，供电网络需具备短时冲击承载能力与快速恢复能力。供电结构应采用分级配电与就地控制相结合方式，降低线路压降与能量损耗^[1]。漏电保护、接地监测与过载防护构成多层安全保障体系，防止因绝缘下降或负载突变引发停机。为适应远程运行模式，供电装置需具备状态监测功能，实现电流、电压与温度参数的实时采集与远程传输，维持电力系统长期稳定运行。

1.3 控制系统协同精度要求

无人化作业环境下，控制系统承担设备协调、动作分配与安全连锁等功能，协同精度直接影响掘进质量与作业效率。控

制平台需构建统一通信协议，实现掘进机、液压支架与运输设备之间的数据互通，避免信息孤立。基于可编程控制器与工业以太网技术，形成高速数据交换通道，缩短指令响应时延。针对截割负载变化与围岩条件差异，控制系统应具备自适应调节能力，通过算法优化实现转速、推进力与支护动作的动态匹配，保障整套装备运行协调一致。

2 供电系统结构优化设计

2.1 供电网络分级与容量配置

井下无人化掘进工作面供电系统需围绕高功率负载集中、设备布置分散的特点构建分级供电网络。主变电所承担电源引入与电压等级转换功能，经移动变电站向掘进工作面延伸，形成“主供—分供—末端配电”三级结构。高压侧采用环网供电方式，提高线路可靠性与故障隔离能力；低压侧通过防爆馈电开关与智能配电箱实现就地控制。容量配置应结合截割电机、液压泵站、皮带输送机等设备的额定功率与启动特性，统筹考虑同时系数与负荷率，预留适度裕量以满足工况波动需求。电缆截面选择依据载流量、压降及热稳定条件进行校核，保证长距离供电条件下端电压稳定。移动设备频繁调整位置，供电线路布设需兼顾柔性敷设与机械防护性能，减少弯折与磨损带来的绝缘老化风险，确保供电网络结构在复杂环境中保持稳定运行。

2.2 负载分配与功率匹配策略

无人化掘进系统中负载类型呈现感性负载占比高、冲击负荷集中的特征，合理分配负载成为供电优化的关键环节。掘进机主驱动电机在截割硬岩时产生较大电流波动，需将其与辅助设备负载进行分区供电，降低瞬时冲击对整体系统的影响^[2]。通过分段控制与软启动装置控制电机启动电流，减少电压跌落现象。液压系统与运输设备运行节奏存在差异，可利用功率因数补偿装置与无功补偿单元调节功率平衡，提高电网利用率。控制层面结合实时负荷监测数据，对各支路电流进行动态评估，实现负载重构与功率优化分配。功率匹配策略还需考虑

设备联动顺序，建立合理的启停逻辑，避免多台大功率设备同时启动造成母线过载。通过精细化负载管理，使供电系统在无人值守条件下保持电气参数稳定。

2.3 电能质量与安全保护设计

井下环境对电能质量要求严格，电压波动、谐波畸变与瞬态过电压均可能影响精密控制单元的稳定运行。为提升电能品质，应在关键节点配置滤波装置与稳压单元，抑制谐波分量对控制电路的干扰。针对长距离电缆传输带来的电压衰减问题，通过合理布局补偿装置与优化配电路径改善末端电压水平。安全保护体系需构建多级防护结构，包含漏电闭锁、过流保护、短路保护及接地监测等功能模块，实现故障快速切除。防爆电气设备的选型应满足煤矿安全规程要求，外壳防护等级与隔爆结构需符合井下使用条件。结合在线监测技术，对温升、绝缘电阻与接地状态进行实时采集，形成预警机制，避免电气故障扩大。供电系统与控制平台联动，实现故障信息同步反馈，提高安全防护响应效率。

3 控制系统集成架构构建

3.1 集中控制与分布执行模式

地面或井下集控中心配置工业控制计算机与冗余服务器，承担数据处理、指令下发与运行策略管理功能；掘进机、液压支架、转载运输设备等终端则部署本安型可编程控制器，完成就地逻辑运算与动作执行。控制层级采用分层分域结构，上层负责作业流程调度与参数优化，下层完成电机启停、阀组控制及连锁保护。为保证系统实时性，关键控制回路在本地闭环运行，避免远程通信延迟对动作精度产生影响。集中控制与分布执行之间通过标准化接口实现数据交互，形成统一控制逻辑框架，在保证响应速度的同时提升整体协调程度，使多设备协同作业更加稳定。

3.2 数据采集与通信网络设计

掘进工作面设备种类多、运行状态复杂，控制系统需建立完善的数据采集体系。各关键部位布设电流、电压、温度、压力、位移及振动传感器，对截割负载、推进速度与支护压力等参数进行实时监测。采集单元通过现场总线或工业以太网接入控制网络，形成多节点数据汇聚结构。通信网络采用环网拓扑与冗余链路设计，提高抗干扰能力与传输可靠性，防爆交换机与本安型通信模块保障井下安全要求^[1]。数据传输过程中引入时间同步机制与数据校验协议，确保信息完整性与时序一致性。针对井下电磁环境复杂的情况，通信电缆采取屏蔽措施并优化布线路径，减少信号衰减与串扰。通过构建稳定高效的数据通道，为上层控制算法与状态分析提供可靠基础。

3.3 远程监控与自动联动机制

控制系统将现场采集数据与视频图像传输至监控终端，形成设备运行状态的综合显示界面，操作人员可通过人机交互系

统完成参数设定与指令调整。自动联动机制基于预设逻辑与实时数据分析结果，对掘进机截割负载、液压系统压力及运输能力进行动态匹配，当负荷变化或异常工况出现时，系统自动调整转速与推进速度，触发连锁保护或限位控制。故障信息通过报警模块即时反馈，并记录运行日志以供分析。远程监控平台与供电系统数据实现互通，构建电气与机械协同调节模式，使无人化掘进工作面保持稳定、高效运行状态。

4 供电与控制一体化融合方案

4.1 统一接口与标准化模块设计

井下无人化掘进系统中，供电装置与控制单元长期分离配置，接口形式多样、协议不统一，易造成信息孤立与维护复杂。为实现一体化融合，需建立统一电气接口规范与通信标准，将馈电开关、变频器、软启动器及 PLC 控制单元纳入同一接口体系。接口设计遵循模块化原则，电源输入、信号采集、控制输出均采用标准化端子与防爆连接结构，便于现场快速更换与扩展。控制模块与配电模块在结构上进行集成布置，形成组合式智能配电控制柜，实现电源管理与逻辑控制同柜运行。硬件层面采用本安型与隔爆型组合结构，满足井下防爆等级要求；软件层面建立统一通信协议与数据格式，实现电气参数与控制指令的无缝交互。标准化模块设计还可降低系统集成难度，提升兼容性与可维护性，为无人化掘进工作面构建统一技术平台。

4.2 联动控制逻辑与信息共享机制

供电系统与控制系统融合后，需构建协同联动逻辑，使电力调配与设备动作形成动态匹配关系。控制平台通过实时采集各支路电流、电压及负载状态，结合设备运行工况，自动调整供电策略与启停顺序。截割电机负荷升高时，系统同步优化液压泵站运行节奏，防止电网出现功率叠加现象；运输设备负载变化时，控制逻辑依据输送能力自动调节掘进推进速度，保持能量分配平衡。信息共享机制依托统一数据库与工业通信网络，将电气参数、设备状态与报警信息集中管理，实现跨系统数据调用^[4]。控制算法基于实时数据进行逻辑判断与策略修正，使供电侧与执行侧形成闭环调节结构。通过建立清晰的连锁关系与优先级管理规则，避免误动作与冲突指令，提高整体运行协调性。

4.3 故障诊断与冗余保障策略

一体化系统运行过程中，电气故障与控制异常可能相互影响，需构建多层次诊断与冗余保障体系。故障诊断模块通过在线监测电流波形、绝缘状态与通信质量，对异常信号进行特征识别与趋势分析，及时定位故障源。控制单元内部设置自检程序与状态监控机制，对输入输出通道与逻辑运算结果进行周期校验，防止程序异常引发误动作。关键供电回路采用双电源或备用支路结构，当主回路出现异常时自动切换至备用线路，维持核心设备运行。通信网络设置冗余链路 with 双网结构，避免单

点故障导致数据中断。对于关键控制模块配置热备份单元，实现控制权平滑转移。多层次保护策略与冗余配置相结合，提高系统抗干扰能力与连续运行能力，保障无人化掘进工作面在复杂环境下保持稳定运行。

5 集成系统运行效果与优化路径

5.1 系统运行稳定性分析

供电与控制一体化集成后，工作面电气与执行环节形成统一协调结构，运行稳定性表现为电压波动幅度减小、设备启停过程平稳以及控制指令响应一致性增强。集中监测平台对关键电气参数与控制信号进行连续跟踪，能够及时识别异常趋势并触发保护逻辑，减少非计划停机现象。供电回路与控制单元之间建立数据联通关系，使负载变化能够快速反馈至调节模块，避免因电流冲击引发系统振荡。通信链路采用冗余结构后，信号丢失概率明显降低，远程操控指令保持连续性。整体运行过程中，系统抗干扰能力与环境适应能力得到强化，设备间协同误差控制在较小范围内，保障无人化掘进作业连续推进。

5.2 无人化作业效率提升表现

一体化系统在运行层面实现电力调配与设备动作的动态匹配，掘进机截割负载变化能够即时反馈至控制算法，推进速度与支护节奏保持同步，减少无效等待时间^[5]。远程操作界面整合电气参数与设备状态信息，操作人员可通过集中终端完成多设备协同调度，缩短指令传递链路。自动连锁与智能调节机

制降低人工干预频率，使作业过程更加连贯。设备运行曲线趋于平稳，机械冲击与电气波动减轻，减少因异常停机造成的作业中断。系统整体协调程度提高后，掘进节拍更加均衡，运输与支护环节与主机动作保持同步，形成稳定高效的连续作业流程。

5.3 综合性能提升与技术完善方向

集成架构运行后，供电质量、控制精度与安全保障能力形成协同提升态势。电气监测数据与控制日志实现统一管理，为运行优化提供技术依据。针对复杂工况，可在现有平台上引入更精细的负载识别算法与自适应调节策略，提高系统对围岩变化的响应能力。模块化设计为功能扩展预留接口，便于接入智能诊断单元与状态评估模型。通信结构可进一步强化数据冗余与信息加密措施，提升传输安全等级。通过持续优化控制逻辑与电能管理策略，使无人化掘进工作面在复杂井下环境中保持协调运行状态。

6 结语

煤矿井下无人化掘进工作面供电与控制系统集成设计，实现电力保障与智能控制深度融合，构建统一架构与协同运行机制。系统在稳定供电、精准控制与安全防护方面形成联动格局，提升设备群协调水平与连续作业能力。一体化技术路径强化了井下电气与控制环节的整体匹配程度，为智能化掘进装备运行提供可靠支撑。

参考文献：

- [1] 梁玉芳.煤矿井下无人化无轨辅助运输路径规划技术研究[J].煤炭工程,2025,57(4):88-92.
- [2] 徐嘉莹.煤矿井下无人化炸药车智能导航与避障系统研究[J].现代盐化工,2025,52(1):54-56.
- [3] 张汉青,张旭,王新来.煤矿井下无人化无轨辅助运输路径规划技术研究[J].漫科学(科技应用),2025(9):22-24.
- [4] 祁世龙.煤矿井下无人化综采关键技术研究[J].山西冶金,2021,44(5):121-122.
- [5] 乔磊.煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础[J].内蒙古煤炭经济,2024(14):34-36.