

智能化背景下矿山机电设备自动化控制系统的升级路径与实践

姜晓博

郑州煤电股份有限公司芦沟煤矿 河南 郑州 452370

摘要: 随着智能矿山战略的深入推进,传统矿山机电设备自动化控制系统在高效生产、安全保障、节能环保等方面面临严峻挑战。本文系统分析智能化对矿山机电设备自动化控制在高效生产、安全保障、节能环保、数据集成等方面的新要求,深入剖析现有系统在系统架构、控制技术、智能化水平、数据利用等方面存在的问题。从系统架构升级、控制技术升级、智能化功能增强、数据管理与利用优化、安全防护升级五个维度提出系统升级路径,并以安徽冬瓜山铜矿为实践案例,验证升级路径的可行性与有效性。研究成果可为矿山企业推进机电设备智能化升级提供理论指导与实践参考。

关键词: 智能化; 矿山机电设备; 自动化控制系统; 升级路径

引言: 矿山机电设备是矿山生产的核心装备,其自动化控制水平直接影响矿山生产效率、安全保障能力和经济效益。随着工业互联网、人工智能、大数据等新一代信息技术的快速发展,智能矿山建设已成为矿业高质量发展的必然选择。本文通过分析智能化对控制系统的新要求,系统设计升级路径,并结合冬瓜山铜矿实践验证其有效性,为矿山企业推进智能化升级提供参考。

1 智能化对矿山机电设备自动化控制的新要求

1.1 高效生产要求

在智能化的大背景下,矿山生产效率的提升路径发生了深刻变革,不再单纯地依靠设备的大型化以及高强度的作业模式,而是将重点放在全流程的协同优化与精准控制上。自动化控制系统作为矿山生产的核心枢纽,需要实现采掘、提升、运输、通风、排水等各个生产环节的紧密协同联动。通过消除各工序衔接过程中的等待时间,让整个生产系统如同一个高效运转的精密机器,最大化地提升系统整体效率。同时,系统必须具备强大的自适应调节能力,能够根据矿石性质的动态变化、设备状态的实时波动,自动且精准地优化控制参数,确保每一台设备都能始终运行在最佳工况点。此外,系统还需支持多目标优化,在全力保证产量的基础上,充分考虑设备寿命、能耗成本等多方面因素,实现综合效益的最大化,推动矿山生产向高效、优质、可持续发展的方向发展^[1]。

1.2 安全保障要求

安全始终是矿山生产的生命线,在智能化时代,对控制系统的安全保障提出了更为严苛的要求。系统必须实现设备状态的全面实时监测,对温度、振动、电流等

关键参数进行细致入微的趋势分析,提前捕捉设备故障的早期迹象,实现故障的早期预警,将安全隐患扼杀在萌芽状态。在危险区域,要配备先进的人员接近探测与设备联锁停机功能,一旦有人员靠近危险区域,相关设备能够立即自动停机,从根本上杜绝人员伤亡事故的发生。控制系统自身要具备极高的可靠性,关键环节采用冗余设计,即使出现单点故障,也不会影响整个系统的正常运行。同时,系统应大力支持远程监控与无人化作业,尽可能减少人员在危险区域的暴露时间,从源头上提升矿山生产的安全保障水平,为矿工的生命安全筑牢坚固防线。

1.3 节能环保要求

绿色发展已成为矿业转型升级的必由之路,节能环保对控制系统的要求也愈发精细。通风系统作为矿山能耗大户,需实现按需供风控制,根据作业面的实际需风量,动态调节风机的转速,避免因过度供风而造成的无效能耗,实现能源的精准利用。排水系统应优化水泵的启停策略,充分利用谷段电价错峰运行,降低排水成本。提升系统则需实现最优速度曲线控制,减少设备启停时的冲击能耗,延长设备使用寿命。此外,控制系统还需对粉尘、噪声、废水等环保指标进行实时监测,联动除尘、降噪、水处理等设备运行,确保各项污染物达标排放,真正实现矿山的绿色生产,推动矿业与生态环境的和谐共生。

1.4 数据集成与决策支持要求

智能化矿山的建设要求打破信息孤岛,实现全流程数据的互联互通。控制系统作为数据的重要源头,必须

具备标准化的数据接口,将设备运行数据实时、准确地上传至矿山工业互联网平台,与生产计划、设备维护、安全管理等业务系统进行深度融合。基于海量的运行数据,系统应支持大数据分析 with 人工智能算法的广泛应用,深入挖掘设备运行的内在规律,不断优化控制策略。通过数据分析,为生产调度提供科学合理的建议,实现生产资源的最优配置;为预测维护提供精准依据,提前安排设备维护计划,减少设备故障停机时间;为能效管理提供决策支持,降低能源消耗,提高能源利用效率^[2]。最终实现从数据到知识再到智慧的跃升,为矿山的高效、安全、绿色生产提供强有力的决策支撑。

2 现有矿山机电设备自动化控制系统存在的问题

2.1 系统架构落后

现有矿山机电设备控制系统多建成于不同时期,普遍采用传统集散控制系统或现场总线控制系统架构,呈现烟囱式垂直分层结构。各子系统独立运行,彼此之间缺乏有效互联,形成信息孤岛。系统扩展性差,新增设备或功能需大量硬件改造和软件开发。通信协议多样且不开放,OPC、Modbus、Profibus等多种协议并存,数据采集和系统集成困难。控制层级扁平化,缺乏边缘计算能力,大量原始数据直接上传造成网络拥塞和处理延迟。

2.2 控制技术陈旧

大量矿山仍沿用传统PID控制、逻辑控制等常规控制算法,参数整定依赖人工经验且固定不变,难以适应工况变化和参数漂移。先进控制策略如模型预测控制、模糊控制、自适应控制等应用不足,系统优化潜力未能充分挖掘。控制算法固化在PLC或DCS中,升级修改需停产实施,灵活性差。人机交互界面停留在参数显示和报警提示层面,缺乏可视化呈现和智能交互功能,操作人员难以直观掌握系统状态。

2.3 智能化水平低

现有系统以自动化为主,智能化功能严重不足。设备状态监测局限于电压、电流、启停状态等常规参数,振动、温度、频谱等深度监测数据缺失,无法实现故障早期预警。故障诊断依赖人工经验,准确率低、响应慢,故障发生后往往已造成设备损坏或生产中断。系统缺乏自学习、自适应能力,无法根据运行数据自动优化控制策略。预测性维护基本空白,设备维修仍以事后维修和计划性维修为主,维修成本高、效率低。

2.4 数据利用不足

矿山机电设备运行产生海量数据,但现有系统数据利用率极低。大量实时数据仅用于监控显示,未被存储和分析,数据价值白白流失。分散在各子系统的

数据因格式不统一、接口不开放,难以汇聚融合。数据质量参差不齐,异常值、缺失值、噪声干扰等问题普遍存在,缺乏有效的数据清洗和治理机制。数据分析停留在简单统计层面,缺乏机器学习、深度学习等先进算法的应用,无法从数据中挖掘深层次规律和优化空间,数据未能真正转化为决策支持能力^[3]。

3 矿山机电设备自动化控制系统的升级路径

3.1 系统架构升级

系统架构升级作为智能化改造的基石,其变革方向清晰明确,即从封闭走向开放、从集中走向分布、从垂直走向扁平。采用工业互联网平台架构,精心构建“端-边-云”协同体系。在现场设备层,智能传感器和控制器被广泛部署,它们如同敏锐的神经末梢,精准且实时地采集设备运行数据,并能在本地进行初步控制操作。边缘层配置的边缘计算网关,则承担着数据预处理、实时分析和快速响应的重任,它能在数据上传云端前进行初步筛选和分析,大大提高数据处理效率。云端平台汇聚全矿数据,成为数据的大本营,为大数据分析、人工智能建模以及跨系统协同优化提供强大支撑。网络层面,积极推进工业以太网和5G无线网络覆盖,实现控制、视频、监测等多业务的融合承载。通信协议标准化采用OPC UA、MQTT等开放协议,打破不同设备和系统间的数据壁垒,让数据在各环节自由流通,为智能化改造筑牢根基。

3.2 控制技术升级

控制技术升级是推动矿山机电设备自动化控制系统迈向新高度的重要驱动力,应推动从常规控制向先进控制、从单机控制向协同控制转变。引入模型预测控制技术,通过建立设备机理模型与数据驱动模型相结合的混合模型,能在线滚动优化和反馈校正,如同为设备安装了精准的导航系统,大幅提升控制精度和响应速度。采用模糊控制和专家系统,可有效处理不确定性和非线性问题,增强系统鲁棒性,使系统在复杂多变的环境中稳定运行。在多设备协同控制方面,开发采掘-运输-提升全流程协同优化算法,实现工序无缝衔接和全局能效最优,让各设备如同默契的团队高效协作。控制算法软件化、模块化,支持在线升级和远程调试,极大提高系统灵活性,快速适应不同生产需求。

3.3 智能化功能增强

智能化功能增强是升级的核心所在,重点聚焦于状态监测、故障诊断、预测维护等功能建设。部署智能传感器网络,对关键设备增加振动、温度、位移、声发射等多维监测,如同为设备配备全方位的“体检仪器”,实现

全方位状态感知。建立基于机器学习的故障诊断模型,通过历史故障数据训练,能精准识别故障模式,实现故障早期预警和精准定位,将故障隐患扼杀在萌芽状态。开发设备剩余寿命预测算法,融合运行工况、维护记录、健康状态等多源数据,动态预测设备剩余寿命,为设备维护提供科学依据。构建预测性维护决策系统,根据预测结果自动生成维护工单,优化备件库存和维护计划,实现从传统的事后维修向视情维护的转变,降低维护成本。

3.4 数据管理与利用优化

数据管理与利用优化旨在唤醒沉睡数据、释放数据潜在价值。建设统一数据采集平台,将分散在各子系统的运行数据实时汇聚,建立矿山机电设备运行数据库,为数据管理提供统一平台。实施数据治理,制定严格的数据标准,开展数据清洗、数据质量评估等工作,确保数据可用、可信、可追溯,让数据成为有价值的资产。构建数据分析和建模平台,集成机器学习、深度学习算法库,支持设备故障诊断模型、能耗优化模型、寿命预测模型的开发和部署,挖掘数据背后的规律。开发数据可视化应用,通过数字孪生技术实现设备运行状态三维可视化展示,让生产管理人员直观掌握系统运行情况,为决策提供有力支持^[4]。

3.5 安全防护升级

安全防护升级需构建覆盖设备、网络、控制、管理的纵深防御体系。在设备层面,控制器和智能设备应具备身份认证、访问控制功能,如同为设备设置坚固的“门锁”,防止非法接入。网络层面,部署工业防火墙、入侵检测系统,划分安全域,实施分区隔离防护,为网络穿上“防护服”。控制层面,采用安全通信协议,关键控制指令加密传输,防止篡改和伪造,确保控制指令的安全可靠。管理层面,建立网络安全管理制度,开展定期安全评估和渗透测试,提升全员安全意识,形成全员参与的安全防护氛围。同时,系统应具备故障自诊断和灾难恢复能力,确保在极端情况下能够快速恢复运行,保障矿山生产连续性,为智能化改造保驾护航。

4 矿山机电设备自动化控制系统升级实践案例

安徽冬瓜山铜矿作为国内大型地下铜矿山,年产铜矿石超400万吨,井下机电设备丰富,涵盖提升、通风、排水等系统。其原自动化控制系统建于2010年前后,采用西门子S7-300 PLC和Profibus现场总线架构,各子系统独

立,数据不互通,故障响应平均要50分钟,通风系统能耗占全矿三成以上,设备非计划停机频繁,严重制约生产与效益。

为解决这些问题,近两年,该矿于2023年依据特定升级路径,开展机电设备自动化控制系统智能化升级。系统架构上,在原有PLC控制层增设边缘计算层,部署12台华为边缘计算网关汇聚数据,还搭建矿山数据中台形成云边协同架构,同时完成井下工业以太环网和5G无线网络覆盖。控制技术方面,主提升系统引入模型预测控制技术,优化速度曲线;通风系统开发按需供风算法,精准调节风机转速;排水系统实现协同控制与避峰就谷运行。智能化功能上,为23台关键设备加装86个智能传感器,建立故障诊断模型,故障预警准确率达93%,还开发设备剩余寿命预测算法,构建预测性维护决策系统。数据管理与利用上,建设统一数据采集平台,实施数据治理,开发设备状态三维可视化平台。安全防护上,部署工业防火墙等保障系统安全。升级后,提升系统效率提高15%,通风系统能耗降低26%,排水系统电费支出减少21%,故障响应和设备停机时间大幅缩短,年综合经济效益超950万元,为矿山企业智能化升级提供了宝贵经验。

结束语

矿山机电设备自动化控制系统智能化升级是矿山企业数字化转型关键。本文分析了智能化在高效生产等多方面对控制的新要求,剖析了现有系统在架构、技术等方面的问题,构建了涵盖架构、技术、功能、数据、安全五维的升级路径。安徽冬瓜山铜矿实践显示,依此路径升级可提升设备效率、降低成本、增强安全保障,带来可观效益。未来,随着新技术发展,系统将更智能协同自主,为智能矿山建设提供有力技术支撑。

参考文献

- [1]王志文.智能矿山背景下的煤矿机电设备管理创新[J].能源与节能,2024(2):309-312.
- [2]许晋飞.浅析智慧矿山背景下煤矿机电技术管理实践[J].中国设备工程,2025(23):26-28.
- [3]赵剑.自动化技术在矿山机电控制中的应用研究[J].当代化工研究,2022(9):93-95.
- [4]梁波.基于智能矿山的煤矿机电技术研究[J].百科论坛电子杂志,2025(16):277-279.