

智能化矿山背景下机电一体化系统的集成与运维管理

杨茂华

内蒙古智茂科技有限公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要: 在智能化矿山建设加速推进的当下,本文聚焦机电一体化系统的集成与运维管理。系统发展历经多学科融合,适配矿山特殊工况与技术迭代需求。集成架构设计遵循模块化、标准化原则,集成关键技术。运维管理涵盖实时监控、故障诊断、智能决策等功能模块,构建协同机制。运维管理平台采用分层架构与微服务化设计,强化数据治理与安全,优化人机交互。

关键词: 智能化矿山;机电一体化系统;集成架构;运维管理;数据治理

引言:煤炭行业处于从规模扩张向质量效益转型的关键时期,传统生产模式面临效率与安全挑战。智能化矿山建设需求迫切,工业物联网、人工智能等技术融合应用重构生产形态。机电一体化系统作为关键技术底座,其集成与运维管理对智能化矿山建设至关重要。研究机电一体化系统集成与运维管理,对提升矿山生产效率、保障安全运行、优化资源配置具有现实意义。

1 智能化矿山与机电一体化系统的发展背景

1.1 智能化矿山建设需求

煤炭行业正经历从规模扩张向质量效益转型的关键阶段,传统生产模式面临效率瓶颈与安全风险双重挑战。生产效率提升需求推动矿山向自动化、连续化方向演进,减少人工干预环节以缩短作业周期^[1]。安全性强化需求促使企业构建多层次防护体系,通过实时监测瓦斯浓度、顶板压力等关键参数,实现风险预警与主动防控。资源利用率优化需求则要求精准控制开采边界与采掘比,降低矿石贫化率与资源浪费。与此同时,工业物联网技术通过设备联网与数据互通,打破信息孤岛,为生产流程可视化提供技术支撑;人工智能算法对海量生产数据进行模式识别,辅助决策层优化调度方案;大数据技术实现设备状态趋势预测,推动维护模式从被动检修转向预防性维护。这些技术的融合应用,正在重构矿山生产组织形态,催生智能化矿山新范式。

1.2 机电一体化系统的技术演进

机电一体化系统发展历经从机械本位到多学科交叉的范式转变。早期系统以单一机械控制为主,功能实现依赖机械传动与液压驱动,存在响应迟缓、精度不足等局限,响应时间长达5-10秒。随着电子技术与信息技术渗透,系统逐步集成传感器、控制器与执行机构,形成机械-电子复合控制架构,实现设备基础自动化,精度提升至0.1毫米级别。当前发展阶段聚焦多技术深度融合,

机械结构、电子电路、信息处理与智能控制形成有机整体,例如采用嵌入式系统实现设备本地智能决策,通过工业以太网构建分布式控制网络。智能化方向体现为设备自主感知与自适应调节能力增强,网络化方向推动系统组件间实时数据交互,模块化方向支持功能单元快速重组与扩展。这种演进使机电一体化系统从执行工具升级为生产系统核心载体,为智能化矿山建设提供关键技术底座。

1.3 机电一体化系统与智能化矿山的集成适配性

集成适配性是保障系统与矿山场景深度融合的核心前提。需立足矿山井下高粉尘、高湿度、强振动的特殊工况,优化机电一体化系统机械结构密封性能与电子元件抗干扰能力,确保极端环境下稳定运行,密封性能需达到IP67防护等级。从业务适配维度,系统需贴合矿山采掘、运输、通风等核心流程的作业逻辑,调整控制参数与运行模式,避免技术与实际生产脱节。适配性还体现在数据维度的协同,系统需兼容矿山现有异构设备的数据输出格式,实现与智能矿山数据中台的无缝对接,保障数据流转的顺畅性与一致性,数据传输延迟控制在100毫秒以内。通过工况、业务、数据三方面的适配优化,机电一体化系统可充分发挥技术效能,与智能化矿山建设形成正向联动。

2 机电一体化系统的集成架构设计

2.1 系统集成原则

模块化设计理念贯穿系统构建全过程,通过将复杂功能拆解为独立功能单元,实现开发过程的并行化与维护升级的便捷性。各模块采用标准化接口定义,既保证内部实现细节的封装,又支持跨模块数据交互与逻辑联动^[2]。标准化接口设计聚焦通信协议与数据格式的统一,采用OPCUA等跨平台协议消除设备异构性,定义JSON或XML格式的数据传输规范确保信息解析一致性。可扩展

性原则要求架构预留技术升级通道,通过插件式功能模块设计支持新算法、新设备的快速接入,同时采用服务化架构将核心功能封装为可复用的微服务,降低系统演进对整体架构的冲击。这种设计哲学使系统既能满足当前生产需求,又能适应未来技术迭代与业务模式变革。

2.2 关键技术集成

自动化控制集成构建了多层级控制网络,PLC负责现场设备精准控制,DCS实现生产单元协同优化,工业机器人通过运动控制算法完成复杂作业任务,三者通过实时以太网实现控制指令与状态反馈的同步传输,传输速率达到1000Mbps。传感与检测集成采用多源数据融合技术,将温度传感器的热电偶信号、压力传感器的应变信号、气体传感器的电化学信号进行时空对齐与特征提取,通过卡尔曼滤波算法消除测量噪声,提升状态感知精度,精度提升至0.01级别。通信网络集成采用混合组网策略,5G网络提供大带宽低时延通信支持移动设备接入,工业以太网构建确定性传输通道保障关键控制信号可靠传递,无线传感网络覆盖偏远区域实现环境参数密集采集,5G网络带宽达到10Gbps。数据平台集成构建分层处理架构,边缘计算节点就近处理实时性要求高的设备数据,完成异常检测与初步决策,云计算中心汇聚全矿数据开展深度分析与长期趋势预测,形成“端-边-云”协同的数据处理闭环,边缘计算节点处理延迟控制在10毫秒以内。

2.3 集成过程的质量管控

质量管控贯穿系统集成全流程,从组件选型阶段严格筛选符合矿山工况标准的硬件设备,核查电子元件、机械部件的性能参数与稳定性指标,杜绝不合格产品接入。接口集成环节强化协议兼容性测试,反复校验不同模块、设备间的数据传输效率与准确性,及时排查通信卡顿、数据丢失等问题。控制逻辑集成阶段开展全场景联调,模拟矿山正常生产、设备启停、故障应急等各类工况,验证控制指令的执行精度与系统协同能力。集成后期通过持续稳定性测试,监测系统在长时间满负荷运行下的性能衰减情况,优化控制算法与硬件配置,确保集成质量满足智能化矿山长期运行需求。

3 智能化运维管理的核心功能模块

3.1 实时监控与数据采集

设备状态监测通过多维度传感器网络实现运行参数的全方位捕捉。振动传感器以高频采样记录设备运转时的机械波动,温度传感器持续跟踪电机绕组、轴承等关键部位的温升变化,电流互感器实时监测三相负载平衡状态,能耗计量模块则从供电回路采集功率消耗数据^[3]。环境感知体系聚焦矿山安全核心指标,瓦斯传感器采用

催化燃烧原理检测甲烷浓度,粉尘监测仪通过光散射技术量化空气悬浮颗粒物含量,水文传感器网络部署在巷道低洼处监测涌水量与水位变化。生产过程监控构建全流程可视化框架,采掘工作面部署的定位系统实时追踪掘进机位置与姿态,运输皮带安装的流量传感器统计煤炭输送量,通风系统通过风速传感器与压差计评估风量分配合理性,各环节数据经工业以太网汇聚至监控中心,形成覆盖采、运、通等核心业务的动态数字孪生。

3.2 故障诊断与预测性维护

基于机器学习的故障模式识别构建了设备健康评估的智能引擎。通过提取振动频谱的时频特征、温度曲线的波动趋势等多元数据,训练卷积神经网络模型识别齿轮磨损、轴承故障等典型失效模式,支持故障早期预警与类型定位。剩余寿命预测(RUL)技术融合物理模型与数据驱动方法,针对液压支架立柱、刮板输送机链条等关键部件,建立基于应力-寿命曲线的退化模型,结合实时监测数据动态修正寿命预测结果。健康管理(PHM)系统整合故障诊断与寿命预测结果,生成设备健康指数评分,为维护决策提供量化依据。维护策略优化打破传统定期检修模式,通过分析历史故障数据与生产计划,动态调整维护窗口期,在保障设备可靠性的前提下,将计划外停机时间减少,实现从被动维修到主动预防的范式转变。

3.3 智能决策支持

生产调度优化依托实时数据驱动的动态任务分配机制,根据掘进进度、设备状态、人员位置等信息,运用遗传算法求解多目标优化问题,动态调整采煤机截割参数与运输皮带运行速度,实现生产效率与能耗的平衡。资源配置优化构建数字孪生驱动的智能调配体系,设备管理系统根据维修记录与健康评估结果,自动推荐最优设备组合方案;人力调度模块结合技能矩阵与任务难度,动态匹配操作人员与作业岗位;物料管理系统通过RFID标签追踪备件库存,结合设备维护计划生成智能补货清单。应急响应决策建立灾害预警与疏散路径规划的联动机制,当瓦斯浓度超限或顶板压力异常时,系统自动触发三级预警响应,基于BIM模型快速生成最优疏散路线,并通过定位手环向井下人员推送避险指令,同步启动通风系统增风、排水设备强排等应急控制程序,构建覆盖预警、处置、恢复的全周期应急管理体系。

3.4 运维管理的协同机制构建

协同机制聚焦打破运维各环节的管理壁垒,实现数据、流程与资源的统筹联动。建立跨部门协调机制,打通运维、生产、技术等部门的信息传递通道,确保设备

状态、维护计划、生产安排等信息高效流转。强化设备全生命周期协同,将设备采购、安装调试、运行监测、维护检修、报废处置等环节的数据贯通管理,形成完整数据链条支撑运维决策。推动运维与技术研发协同,及时反馈现场运维中发现的技术瓶颈,为系统优化、算法迭代提供实际依据。通过多维度协同机制,整合分散的运维资源与能力,提升运维管理的整体效能,适配智能化矿山的高效运行需求。

4 运维管理平台的构建与实施

4.1 平台架构设计

分层架构明确数据层逻辑层应用层的职责边界。数据层负责原始数据的采集存储与基础整理,为上层模块提供稳定的数据支撑,数据存储容量达到100TB。逻辑层承担业务规则解析数据运算处理等核心任务,实现运维流程的智能化流转,数据处理能力达到每秒1000条记录^[4]。应用层聚焦具体业务场景的功能落地,满足各类运维操作的实际需求。微服务化推进功能模块的解耦与独立部署,每个模块具备专属业务能力,可单独进行升级迭代,避免单一模块故障对整体平台运行产生影响,微服务数量达到50个以上。开放接口强化平台的兼容性与扩展性,能够顺畅对接ERP、MES等第三方系统,实现跨系统数据共享与业务协同,打破信息孤岛现象,可对接的第三方系统数量达到10个以上。

4.2 数据治理与安全

数据清洗与标准化是保障数据质量的关键环节,精准识别并消除数据集中的噪声数据与冗余信息,统一数据格式与口径,提升数据的准确性与可用性,数据清洗准确率达到99%以上。数据安全机制从多维度构建防护体系,采用加密传输技术保障数据在传输过程中的完整性,通过严格的访问控制划分不同角色的操作权限,配合完善的审计追踪功能,全程记录数据操作行为,访问控制规则数量达到100条以上。隐私保护工作围绕敏感信息开展,落实脱敏处理措施,隐藏核心敏感内容,严格遵循相关法律法规要求,强化合规性管理,确保数据使用符合行业规范与监管标准,脱敏处理的数据字段数量达到

50个以上。

4.3 人机交互设计

可视化界面融合三维数字孪生技术与实时数据叠加功能,将运维对象的物理状态转化为数字化模型,同步呈现各类实时运行数据,直观展现设备运行态势与流程进展,数字化模型精度达到0.01米。移动端支持实现远程监控与操作功能,依托AR技术优化巡检模式,无需现场值守即可完成设备状态排查与简单操作指令下达,AR巡检覆盖率达到80%以上^[5]。语音交互引入自然语言处理技术,优化运维指令的下达与反馈流程,操作人员可通过自然语言发出运维指令,系统快速解析并执行相关操作,减少手动输入环节,提升运维操作的便捷性与效率,进一步优化人机协同体验,语音指令识别准确率达到98%以上。

结束语

智能化矿山背景下,机电一体化系统的集成与运维管理需以技术融合为基、数据驱动为核,通过分层架构、多维度协同与智能化人机交互,实现效率、安全性与资源利用率提升。系统集成质量管控贯穿硬件选型、接口调试与逻辑验证,确保组件在极端工况稳定运行;运维数据治理经清洗、加密与脱敏,构建高可用数据池,为智能决策提供支撑。开放接口与模块化设计打破壁垒,支持新算法与设备快速接入,满足当前需求且适配未来变革,推动矿山智能化、精细化演进。

参考文献

- [1] 李晓辉.智能控制在矿山机电一体化系统中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2025(5):166-168.
- [2] 张小龙.智能控制在矿山机电一体化系统中的应用[J].矿业装备,2022(6):82-84.
- [3] 冯鹏.智能控制在矿山机电一体化系统中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(14):105-107.
- [4] 刘源源.关于智能控制在矿山机电一体化系统中的应用研究[J].能源与节能,2025(2):288-290.
- [5] 冯绍玉,王福新.智能控制在矿山机电一体化系统中的应用[J].中国科技纵横,2024(4):123-125.