

煤矿机电设备一体化技术应用分析

马福龙

宁夏王洼煤业有限公司银洞沟煤矿 宁夏 银川 750004

摘要: 煤矿机电设备一体化技术是煤炭工业向智能化、无人化方向发展的关键支撑。本文从机电一体化的基本内涵与技术架构出发,系统分析了采掘设备、运输提升设备、通风排水设备及支护设备中一体化技术的典型应用形态与技术特征,阐述了传感检测、自动控制、信息处理与执行驱动等核心技术模块在煤矿特殊环境下的集成方式。在此基础上,探讨了设备互联互通、数据融合分析与协同控制等系统集成层面的关键技术问题,并深入剖析了当前应用中存在的环境适应性不足、系统兼容性欠缺及运维管理滞后等现实挑战,进而从可靠性设计、标准化建设、智能运维及人才培养等方面提出改进策略,旨在为煤矿机电装备的智能化升级提供系统性的技术参考。

关键词: 煤矿机电设备;一体化技术;智能矿山;自动化控制;系统集成

引言

煤炭资源在我国能源结构中占据基础性地位,煤矿安全生产和高效开采始终是行业发展的核心主题。随着开采深度的不断增加和开采条件的日趋复杂,煤矿机电设备承担的任务越来越繁重,对设备的自动化水平、运行可靠性及协同作业能力提出了更高要求。传统煤矿机电系统采用“机械装备+分立控制”的模式,设备之间的信息交互有限,控制决策依赖人工经验,难以适应现代煤矿对安全、效率和智能化的综合需求。机电一体化技术作为机械工程、电子技术、自动控制、计算机科学与信息技术深度融合的产物,为解决上述问题提供了有效途径。该技术的核心思想在于通过嵌入式系统、传感器网络和执行机构的有机结合,使设备具备自感知、自判断和自调节能力,从而实现单机智能化与系统协同化。近年来,随着物联网、大数据和人工智能技术在矿山领域的逐步渗透,煤矿机电设备一体化已从早期的单机自动化向全流程智能管控的方向演进,成为智慧矿山建设的重要技术支撑。

1 煤矿机电设备一体化的技术内涵与架构

1.1 机电一体化的基本概念

机电一体化并非机械与电气的简单叠加,而是一种系统化的设计理念和集成技术。它强调在设备研发之初便将机械结构、动力系统、传感检测、信息处理和执行控制纳入统一的工程框架中进行优化设计,使各组成部分之间形成紧密的协同关系,最终实现设备整体性能的最优化^[1]。其本质特征包括:结构上的一体化——传感元件、控制器和执行器嵌入设备本体而非外挂附加;功能上的智能化——设备能够自主感知运行状态并作出适应性调节;信息上的数字化——设备运行参数可采集、可

传输、可分析。

1.2 煤矿机电设备一体化的技术架构

煤矿机电设备一体化系统可划分为五个层次。感知层由各类传感器组成,包括压力传感器、温度传感器、位移传感器、瓦斯浓度传感器及电流电压互感器等,负责采集设备运行数据和环境参数。传输层依托工业以太网、现场总线或无线通信网络,将感知层获取的数据安全、实时地传递至上层系统。控制层以可编程逻辑控制器、嵌入式控制器或工业计算机为核心,根据预设逻辑或智能算法对执行机构发出指令。执行层由变频器、液压阀组、电磁启动器等元件构成,将控制信号转化为机械动作。决策层则位于最顶端,通过数据融合与分析,为操作人员提供故障诊断、工况优化和调度决策支持。五个层次环环相扣,共同构成了煤矿机电设备一体化的完整技术链条。

2 煤矿主要机电设备的一体化技术应用

2.1 采掘设备的一体化技术应用

采煤机和掘进机是煤矿生产的核心装备,其一体化程度直接决定了工作面的生产效率和安全水平。现代采煤机已普遍集成截割电机恒功率自动控制、牵引速度自适应调节及滚筒高度自动调高等功能,通过安装在机体上的振动监测仪、扭矩传感器和温度检测元件实时感知截割工况,控制系统根据负载变化自动调整牵引速度和滚筒转速,使设备始终运行在最佳截割状态。在此基础上,部分高端采煤机还配备了记忆截割功能,能够记录人工操作轨迹并在后续循环中自动复现,配合惯导系统和激光雷达实现工作面自动调直。掘进机方面,一体化技术主要体现在截割臂自动定位、断面自动成形及除尘系统的联动控制上,通过位姿检测与液压比例控制的结

合,使巷道成形精度和作业效率得到显著提高。

2.2 运输提升设备的一体化技术应用

煤矿运输系统包括带式输送机、刮板输送机及提升机等,这些设备的运行特点是长距离、大功率、连续作业,对驱动系统的调速性能和安全保护功能要求较高。机电一体化技术在该领域的核心应用体现为变频驱动与智能监控的集成。以带式输送机为例,通过多点驱动变频调速系统实现软启动和功率平衡,有效降低启动冲击和胶带动张力;沿输送带布置的跑偏传感器、温度传感器和烟雾传感器构成安全监测网络,发现异常时控制系统可自动执行降速或停机操作,同时将故障信息上传至地面调度中心^[2]。提升机的电控系统则将速度给定、力矩控制、制动控制和深度指示功能融为一体,采用全数字调节方式,使提升速度曲线精确可控,减速段和爬行段的控制精度大幅提高,同时安全回路实现了硬件冗余和软件监控的双重保护。

2.3 通风排水设备的一体化技术应用

主通风机和排水泵是保障矿井安全的关键设备,其运行可靠性和能耗水平备受关注。一体化技术使这两类设备从简单的手动启停控制走向智能运行管理。主通风机系统集成风量、风压、轴承温度、振动幅值等多种传感器,控制器根据井下各用风区域的需求变化自动调节叶片角度或电机转速,实现按需供风,既保证了通风安全又节约了电能。排水系统方面,水位传感器实时监测水仓水位变化,控制器根据水位高低动态调度水泵的启停次序和运行台数,使各水泵运行时间均衡分配,避免单台设备过度磨损。更为先进的系统还具备排水管路阻塞在线诊断和水泵特性曲线在线辨识功能,能够在性能劣化初期发出维保提示,防止突发故障导致淹井事故。

2.4 支护设备的一体化技术应用

液压支架是综合机械化采煤工作面的重要支护装备,其与采煤机、刮板输送机的协同作业是实现自动化工作面的基础。液压支架的电液控制系统是机电一体化技术的典型应用——每个支架配备独立的控制器,通过压力传感器监测立柱下腔压力以判断顶板状态,通过位移传感器检测推移行程以控制移架步距。在工作面集控中心统一协调下,液压支架可根据采煤机的位置信号自动完成邻架或成组顺序动作,实现降柱、移架、升柱、推溜等工序的自动化执行。端头支架和超前支架的一体化程度也在不断提高,通过集成姿态传感器和压力监测模块,系统能够感知围岩活动规律并自动调整工作阻力,改善了端头区域的支护效果。

3 煤矿机电设备一体化系统中的关键技术

3.1 传感检测与状态感知技术

传感检测是机电一体化系统获取外部信息和自身状态的窗口,其性能直接决定了控制决策的准确性。煤矿井下环境特殊,传感器除需满足常规的精度和线性度要求外,还必须具备防爆、防水、防尘及抗电磁干扰能力。当前常用的传感类型包括:用于位置和位移检测的霍尔传感器和编码器;用于压力和液位检测的应变式或压阻式传感器;用于温度检测的热电阻和热电偶;用于气体浓度检测的红外或催化燃烧式传感器;用于振动分析的压电加速度计。多传感器融合技术正逐渐受到重视,通过对不同类型传感数据的综合处理,能够有效提高状态估计的准确性和鲁棒性,为设备健康管理提供更可靠的数据基础。

3.2 自动控制与智能调节技术

控制技术是机电一体化的核心,它将感知信息转化为有效的控制决策。在煤矿机电设备中,控制算法的选择需要兼顾快速响应性、稳态精度和抗扰动能力。PID控制因其结构简单、可靠性高在转速调节和压力控制中仍有广泛应用。对于具有非线性、时变特征的控制对象,如采煤机截割负载变化和液压支架的液压系统控制,模糊控制和自适应控制展现出更好的适应性^[3]。近年来,随着控制器运算能力的提升,预测控制和自抗扰控制等先进算法也开始在提升机速度控制和通风机风量调节中尝试应用,在改善动态响应和抑制外部扰动方面取得了良好效果。无论采用何种算法,煤矿控制系统的第一原则始终是安全可靠,任何控制策略都必须在保障安全的前提下追求性能优化。

3.3 信息处理与通信网络技术

信息处理能力是机电一体化系统的“大脑”功能,涉及信号的滤波去噪、特征提取、数据压缩和智能诊断等环节。嵌入式处理器和数字信号处理器的发展使实时信号处理成为可能,设备控制器能够在毫秒级时间内完成数据采集、算法运算和指令输出。通信网络则是系统的“神经网络”,将分布于井上井下的各类设备连接为有机整体。目前煤矿普遍采用千兆工业以太网作为骨干网络,具有冗余自愈功能,链路中断时可在数十毫秒内恢复通信。设备层则多采用CAN总线、Profibus或Modbus等现场总线协议,部分移动设备已开始使用5G或WiFi无线通信方式实现数据交互。通信网络的带宽和实时性正在不断提升,为远程控制和视频监控等高带宽应用创造了条件。

4 一体化技术应用中存在的问题与对策

4.1 环境适应性与可靠性问题

煤矿井下存在瓦斯、煤尘、潮湿、振动和供电质量差等恶劣条件,对机电一体化设备的适用性构成严峻考验。电子元件在高温高湿环境下故障率显著上升,传感器零点漂移和灵敏度衰减加速,通信线路因机械损伤或腐蚀而频繁中断,这些问题在采掘工作面等前沿区域尤为突出。部分设备在出厂时虽通过了型式检验,但在实际工况下的长期运行可靠性仍不尽如人意。改善这一状况需要从设计源头入手,严格执行矿用产品防爆标准,在电路设计上采用本质安全型或隔爆型方案,在结构上加强密封和散热设计,在器件选型上优先采用工业级或军用级宽温芯片。同时,应在设备投入使用前进行充分的现场工况模拟测试,避免将实验室条件下的性能直接等同于井下实际表现。

4.2 系统兼容性与标准化问题

当前煤矿机电设备往往由多个厂家提供,不同设备之间的通信协议、数据格式和接口标准存在差异,给系统集成和数据共享造成了较大困难。一个煤矿可能同时使用多种品牌的控制器和上位机软件,数据互通需要频繁进行协议转换,增加了系统的复杂性和故障点。设备更新换代时,新旧系统之间的兼容问题更为突出,有时不得不进行大规模的重复投资^[4]。解决这一问题的根本途径在于推动行业标准化工作,制定统一的煤矿机电设备通信接口规范和数据交换标准,鼓励设备制造商遵循标准协议开发产品。同时,在煤矿信息化总体规划中应预留充分的扩展接口,采用模块化设计思路,使新增设备能够便捷地接入已有系统,避免形成新的信息孤岛。

4.3 维护管理滞后与人才短缺

机电一体化设备技术含量高、维修难度大,要求维护人员具备机械、电气、自动化和网络通信等多学科知识。然而,许多煤矿的机电维护队伍仍以传统机械维修和电工为主体,对智能化设备的故障诊断和维修能力明显不足,一旦出现复杂故障往往依赖厂家售后服务,响应周期长且费用高昂。在设备管理方面,部分煤矿仍沿

用故障后维修为主的模式,缺乏基于状态监测的预防性维护体系,等到设备发生严重故障才停机检修,影响了生产连续性。对此,煤矿企业应加大复合型机电人才的引进和培养力度,与高等院校合作开设定向培训课程,提升在职人员的智能装备维护技能。同时建立设备全生命周期管理档案,推行基于状态的预测性维修策略,通过分析运行数据的趋势变化提前安排维护计划,将故障消灭在萌芽状态。

5 结语

煤矿机电设备一体化技术是推动煤炭工业转型升级、实现安全高效开采的重要技术路径。本文从技术内涵与架构出发,系统分析了采掘、运输、通风排水和保护等主要环节中一体化技术的应用实践,阐述了传感检测、自动控制和通信信息等关键技术,在煤矿特殊条件下的集成方式,同时正视了当前在环境适应性、系统兼容性、运维管理等方面存在的现实问题。可以预见,随着5G、人工智能、数字孪生等新兴技术与煤矿装备的深度融合,机电一体化将向更高层级的智能化演进,未来的煤矿机电系统将不再是单机自动化的简单集合,而是具备自感知、自决策、自执行和自我优化能力的完整生态。在这一进程中,技术突破与人才培养必须同步推进,标准建设与制度完善需要紧密配套,唯有如此,煤矿机电设备一体化的潜力才能得到充分释放,为智慧矿山建设奠定坚实的装备基础。

参考文献

- [1]李国平,张伟.煤矿智能化开采装备技术发展现状与趋势[J].煤炭科学技术,2023,51(1):45-53.
- [2]刘建民,王海峰.电液控制系统在液压支架中的一体化应用研究[J].工矿自动化,2022,48(4):72-78.
- [3]赵志强,陈晓东.基于物联网的煤矿机电设备状态监测系统[J].煤矿机械,2021,42(7):156-160.
- [4]王亚君,高飞.煤矿机电一体化技术集成与协同控制研究综述[J].煤炭工程,2024,56(2):88-94.