煤矿智能化设备机电一体化技术的应用探析

赵利峰
北联电能源开发公司高头窑矿业公司 内蒙古 鄂尔多斯 014323

摘 要 随着煤炭行业智能化转型的深入推进，机电一体化技术作为煤矿智能化设备的关键支撑，实现了机械传动、电气控制与信息处理的深度融合，并提升了煤矿开采的安全性、效率与智能化水平。本文基于煤矿智能化发展的现实需求，从机电一体化技术的架构出发，深入探析其在煤矿采掘、运输、通风、监测监控等关键环节智能化设备中的应用机理，重点研究传感器融合、变频调速、PLC控制与工业物联网等关键技术的实践应用，旨在为煤矿行业高质量发展提供技术保障。

关键词 煤矿智能化；机电一体化；传感器融合；变频调速；PLC控制

Analysis of the Application of Mechatronics Technology in Intelligent Coal Mine Equipment

Zhao Li-feng
Beiliandian Energy Development Co., Ltd. Gaotouyao Mining Company, Ordos 014323, Inner Mongolia, China

Abstract With the deepening of intelligent transformation in the coal industry, mechatronics technology, as a key support for intelligent coal mine equipment, achieves deep integration of mechanical transmission, electrical control, and information processing, thereby enhancing the safety, efficiency, and intelligence level of coal mining. Based on the practical needs of intelligent coal mine development, this paper starts from the architecture of mechatronics technology and deeply analyzes its application mechanism in intelligent equipment for key coal mine processes such as mining, transportation, ventilation, and monitoring. It focuses on the practical application of key technologies such as sensor fusion, variable frequency speed regulation, PLC control, and the Industrial Internet of Things, aiming to provide technical support for the high-quality development of the coal industry.

Key words Intelligent Coal Mine; Mechatronics; Sensor Fusion; Variable Frequency Speed Regulation; PLC Control

煤炭作为我国能源安全的压舱石，其开采效率与安全水平直接关系到能源供给的稳定性。传统煤矿开采模式依赖人工操作，存在作业环境恶劣、安全风险高、生产效率低、资源浪费严重等诸多痛点。随着《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的出台，智能化转型已成为煤炭行业的必然趋势。机电一体化技术将机械工程、电气工程、计算机技术、信息技术等多学科深度融合，为煤矿智能化设备的研发与应用提供了技术支撑，实现了煤矿开采过程的自动化、精准化与智能化控制。

1 煤矿智能化设备机电一体化技术的架构分析

煤矿智能化设备机电一体化系统的目标是实现感知—决策—执行闭环控制，架构由机械执行、电气控制、信息处理、通信传输四大模块构成并协同运作[1]。机械执行模块为基础载体，承担采掘运输等核心作业，保障作业效率与可靠性；电气控制模块作为核心控制单元，接收指令驱动执行模块，同时监测设备运行状态；信息处理模块负责分析传感器数据并生成控制决策，是智能化关键；通信传输模块采用有线与无线结合的方式，保障数据实时稳定传输，适配井下复杂环境。

2 煤矿智能化设备中机电一体化技术的应用

2.1 采掘设备中的机电一体化技术应用

采掘设备是煤矿生产核心，机电一体化技术通过感知、控制、执行闭环架构实现精准作业与状态自感知，应用于综采工作面采煤机、液压支架及刮板输送机[2]。采煤机以PLC为控制核心，集成多传感器融合体系，经算法降噪实现煤岩界面精准识别，动态调节牵引变频与滚筒调高参数，适配煤层工况。同时，通过振动、温度传感器监测运行状态，异常时触发预警与保护。液压支架采用电液比例控制、采集姿态与支护阻力数据并联动采煤机位置，动态生成支护策略，保障顶板稳定。刮板输送机通过多电机变频协同控制实现负载均衡，适配采煤机割煤量，异常工况下紧急停机并记录数据，为运维工作提供支撑。

2.2 运输设备中的机电一体化技术应用

运输系统机电一体化能够实现负载自适应与安全可控，重点应用于带式输送机与井下电机车。带式输送机采用PLC+变频

调速闭环控制，速度（0 ~ 10 kHz）、张力（0 ~ 500 kN）、跑偏（ ± 15° ）传感器实时采集运行参数，信息处理模块基于输送量模型动态调节变频器输出频率，使带速在1.2 ~ 4m/s精准调节，张力偏差 > 10%时经液压装置自动补偿，跑偏量 > 50 mm时触发纠偏油缸动作（响应≤2 s）[3]。温度（−20 ~ 200 ℃）与烟雾（0.1 mg/m³灵敏度）传感器构建火灾预警体系，胶带表面温度 > 85 ℃或检测到烟雾时，立即切断电源、启动灭火装置并联动相邻输送机停机，形成安全闭环。井下电机车采用DSP+GPS/惯性导航融合定位，信息处理模块基于电子地图与调度指令，通过模型预测控制算法规划最优行驶路径。驱动系统采用矢量控制变频器实现0 ~ 1.5 m/s²平滑加减速，避障传感器检测到障碍物时触发紧急制动。通过5G工业模组将速度、位置、电池电量等状态数据实时传输至地面调度中心，实现多车协同调度、避开路径冲突，提升运输效率。

2.3 通风设备中的机电一体化技术应用

通风系统是煤矿安全的重要保障，机电一体化技术通过精准调速与智能诊断实现通风量动态匹配，其关键载体为主通风机。主通风机采用PLC+变频调速变风量控制，瓦斯、粉尘、风压传感器实时采集井下环境参数，信息处理模块根据通风网络阻力模型计算最优通风量，通过调节变频器输出频率改变风机转速，使通风量在10 000 ~ 50 000 m³/h范围内连续可调。当瓦斯浓度 > 0.8%时，风机自动提速至额定转速运行。设备状态监测采用振动频谱分析技术，由加速度传感器采集电机、轴承振动信号，经FFT变换提取特征频率，若1倍频、2倍频幅值异常时判定为不平衡或不对中故障。温度传感器实时监测轴承温度，当温度 > 95 ℃时系统发出预警。系统可自动记录故障数据并生成趋势分析曲线，为预防性维护提供依据。

2.4 监测监控设备中的机电一体化技术应用

监测监控系统通过机电一体化技术构建全场景安全感知网络，由多源异构传感器网络与嵌入式数据处理终端组成。传感器网络采用红外吸收式气体传感器、霍尔电流/电压传感器、高精度温湿度传感器。数据采集终端基于ARM Cortex-A9处理器，集成多路模拟量/数字量采集接口，完成传感器数据滤波、放大与16位A/D转换，并通过工业以太网与5G双模传输方式保障数据的实时性。地面监控中心采用边缘计算架构，运行LSTM神经网络预测模型对监测数据进行趋势分析，提前15 ~ 30 min预警瓦斯积聚、设备过热等风险。当数据超出阈值时，系统自动触发联动控制：瓦斯浓度 > 1.0%时，切断作业区域电源并启动备用通风机；电机电流持续超额定值1.2倍时，触发停机保护，形成监测、预警、处置全流程智能管控。

3 煤矿智能化设备机电一体化的关键技术分析

3.1 传感器融合技术

在煤矿复杂的作业环境中，单一传感器的监测数据易受环境干扰，导致数据精度不足。传感器融合技术通过将多类型、不同位置的传感器采集的数据进行融合处理，有利于提升数据的可靠性与精准度[4]。在煤矿智能化设备中，传感器融合技术广泛应用于煤岩识别、设备姿态监测、环境参数监测等场景。例如，在采煤机的煤岩识别中，系统融合了红外传感器采集的煤岩温度数据、超声波传感器采集的煤岩距离数据与激光传感器采集的煤岩反射率数据，通过卡尔曼滤波算法对这些数据进行融合处理，实现对煤岩界面的精准识别。

卡尔曼滤波算法是传感器融合中常用的算法，主要通过预测与更新两个步骤，实现对动态系统状态的最优估计。状态预测方程如下：

$$\hat{X}_k^- = A\hat{X}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (1)$$

式中，$\hat{X}_k^-$—k时刻的先验状态估计值；A—状态转移矩阵；$\hat{X}_{k-1}$—$k-1$时刻的后验状态估计值；B—控制输入矩阵；u_{k-1}—$k-1$时刻的控制输入。

状态更新方程如下：

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k(Z_k - H\hat{X}_k^-) \quad (2)$$

式中，$\hat{X}_k$—k时刻的后验状态估计值；K_k—卡尔曼增益；Z_k—k时刻的传感器观测值；H—观测矩阵。通过卡尔曼滤波算法的处理，能够有效消除传感器数据中的噪声，提升煤岩识别的精准度，为采煤机的精准割煤提供可靠的数据支撑。

3.2 变频调速技术

变频调速技术通过改变电机的供电频率，实现对电机转速的精准调节，具有节能、启动冲击小、调速范围广等优点，是煤矿智能化设备机电一体化系统中的关键技术之一。在煤矿采掘、运输、通风等设备中，变频调速技术的应用提升了设备的运行效率与能源利用率。变频调速技术的核心设备是变频器，其工作原理是将工频交流电转换为直流电，再通过逆变器将直流电转换为频率可调的交流电，从而改变电机的供电频率，实现电机转速的调节[5]。电机的转速公式如下：

$$n=60f(1-s)/p \quad (3)$$

式中，n—电机转速；f—供电频率；s—转差率；p—电机极对数。通过改变供电频率f，能够直接改变电机的转速n，从而实现对设备运行速度的精准控制。在带式输送机中，变频调速技术的应用实现了输送机的软启动与负载自适应调节。当输

送机启动时，变频器输出频率从低到高逐渐增加，电机转速缓慢上升，避免了启动冲击对设备造成的损坏；当输送机的负载发生变化时，传感器实时采集电机电流等数据，信息处理模块根据负载数据调整变频器输出频率，使电机转速与负载相匹配，降低设备能耗。

3.3 PLC控制技术

PLC可编程逻辑控制器是煤矿智能化设备机电一体化系统的核心控制部件，具有可靠性高、抗干扰能力强、编程简单、扩展性好等优点，能够适应煤矿井下复杂的作业环境。PLC控制技术通过编写控制程序，实现对设备的逻辑控制、运动控制、过程控制等功能，是实现设备自动化控制的关键。在煤矿智能化设备中，PLC控制器通过输入模块接收传感器、按钮等输入设备的信号，根据预设的控制程序对这些信号进行逻辑运算，再通过输出模块向变频器、电磁阀等执行设备发送控制指令，实现对设备的精准控制[6]。例如，在液压支架的控制中，PLC控制器接收位移传感器、压力传感器采集的信号，结合采煤机的位置信号，通过逻辑运算生成升架、降架、推移等控制指令，驱动液压系统执行相应的动作，实现液压支架的自动跟机控制。此外，PLC控制器还具有通信功能，可与变频器、触摸屏、地面监控中心等设备进行数据交互，实现对设备的远程监控与调试。

3.4 工业物联网技术

工业物联网技术是实现煤矿智能化设备互联互通的关键，能够将设备、传感器、控制器等节点接入网络，实现数据的实时采集、传输与共享，为煤矿的智能调度与管理提供数据支撑。工业物联网技术在煤矿领域的应用，推动了从设备级控制向系统级管理的升级，提升了煤矿的整体运营效率。在煤矿智能化系统中，工业物联网技术采用分层架构，主要包括感知层、网络层与应用层。感知层由大量的传感器、RFID标签等设备组成，负责采集设备运行数据与环境数据；网络层采用有线与无线相结合的通信方式，负责数据的传输；应用层包括地面监控中心、智能调度系统等，负责对数据进行分析处理与应用。立足于工业物联网技术，地面监控中心能够实时获取井下各智能化设备的运行状态数据、与环境监测数据，实现对整个煤矿生产过程的远程监控与调度。例如，当某一采掘工作面的煤量增加时，地面调度中心通过工业物联网系统实时获取带式输送机的运行数据，调整输送机的运行速度，保障煤炭的顺畅运输。同时，系统可根据各工作面的生产数据合理分配生产任务，提升整体生产效率。

4 结束语

综上所述，机电一体化技术作为煤矿智能化设备的重要支撑，实现了机械传动、电气控制与信息处理的深度融合，在煤矿采掘、运输、通风、监测监控等关键环节得到了广泛应用。随着人工智能、大数据等技术的发展，煤矿智能化设备机电一体化技术将朝着智能化、国产化、绿色低碳化、协同化与集成化方向发展。未来，应加强关键核心技术的研发与创新，提升设备的自主可控水平，推动各系统的深度融合，实现煤矿生产的全流程智能化控制，为我国煤炭行业的智能化转型与高质量发展提供更强有力的技术支撑。

参考文献

[1]徐明智,马增玺.煤矿掘进设备机电一体化智能控制系统优化设计与应用研究[J].中国高新科技,2025(16):25-27.

[2]李晓辉.机电一体化技术在煤矿智能设备中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2025(7):124-126.

[3]田贵军.机电一体化技术在煤矿智能设备中的应用[J].矿业装备,2024(7):71-73.

[4]马金利.机电一体化的煤矿设备管理[J].中国设备工程,2023(9):67-69.

[5]张小建.煤矿生产中机电一体化技术的问题及改进策略[J].能源与节能,2025(1):167-169.

[6]高君.试论机电一体化技术在煤矿机械设备中的应用[J].西部探矿工程,2024,36(9):158-161.

（本文编辑　曹　阳）

