

工业电气仪器仪表自动化控制

郭腾飞

上海煤科检测技术有限公司 上海 201400

摘要：本文聚焦工业电气仪器仪表自动化控制技术在煤矿领域的应用，系统阐述其技术原理与实践路径。通过剖析煤矿仪器仪表分类及检测原理，揭示电气参数检测仪表、传感器与专用设备的自动化功能；结合电动机、电缆及防爆设备检测案例，阐明自动化检测技术的具体应用；从硬件集成、软件功能及通信协议三方面解析矿用自动化检测系统架构。研究成果表明，该技术可实现煤矿电气设备状态实时监测与故障精准诊断，显著提升生产安全性与设备管理效率。

关键词：工业电气仪器仪表；矿用自动化检测；技术应用；架构

引言：随着煤矿开采向深部化、智能化发展，矿用电气设备的安全稳定运行成为行业关注焦点。传统人工检测模式存在效率低、误差大、风险高等弊端，难以满足现代化煤矿生产需求。工业电气仪器仪表自动化控制技术融合传感器、数据处理与智能控制技术，为设备状态监测与故障预警提供了新方案。本文以煤矿应用场景为切入点，深入研究仪器仪表自动化检测技术的原理、应用及系统架构，旨在探索提升煤矿电气设备可靠性与安全性的有效路径，推动煤矿安全生产技术的创新发展。

1 工业电气仪器仪表自动化控制技术概述

工业电气仪器仪表自动化控制技术，是融合电子信息、自动控制理论与传感器技术，实现对工业生产中电气参数实时监测、精准控制及智能决策的综合性技术体系。该技术通过仪器仪表对电流、电压、温度、压力等物理量进行采集与分析，结合自动化控制系统实现设备的高效、稳定运行，是现代工业智能化转型的核心支撑。其核心技术涵盖传感器技术、数据处理技术与自动化控制算法。高精度传感器负责将物理信号转换为电信号，如霍尔传感器监测电流、光纤传感器检测温度；数据处理技术依托边缘计算与云计算平台，对海量实时数据进行滤波、特征提取与故障诊断；自动化控制算法则通过PID调节、模糊控制等策略，实现对电气设备的动态优化控制。三者协同工作，确保系统的可靠性与响应速度。

在应用层面，该技术广泛渗透于电力、化工、煤矿等领域。如在煤矿安全生产中，通过自动化检测仪表实时监测电气设备绝缘状态、运行温度，结合AI算法预判故障风险；在电力系统中，智能电表与自动化开关配合，实现电网负荷的动态平衡与故障隔离。此外，工业机器人、智能仓储等新兴场景也依赖该技术实现设备的

精准控制与协同作业^[1]。工业电气仪器仪表自动化控制技术显著提升了生产效率与安全性，减少人工干预带来的误差与风险，降低设备维护成本。

2 煤矿仪器仪表的分类与检测原理

2.1 电气参数检测仪表

万用表、示波器、功率分析仪是煤矿电气参数检测的核心工具。数字万用表通过高精度A/D转换模块，可自动完成电压、电流、电阻等参数的测量，其自动化功能体现在可编程量程切换与数据存储上，能快速定位电路短路、接触不良等故障。示波器则通过高速采样技术，将复杂的电信号波形可视化，帮助技术人员分析电机启动电流突变、谐波干扰等问题。功率分析仪可实时监测电气设备的有功功率、无功功率及功率因数，结合自动化控制系统，能对负载异常进行动态预警，避免因过载导致的设备损坏。

2.2 传感器与状态监测仪器

温度传感器、振动传感器和绝缘电阻测试仪是设备状态监测的“神经末梢”。煤矿井下环境复杂，高温、潮湿易引发设备过热与绝缘老化，温度传感器（如热电偶、红外测温仪）通过非接触或接触式测温，将数据实时传输至控制系统，当温度超过阈值时触发声光报警。振动传感器基于压电效应，可捕捉设备运行时的振动频率与幅值，通过频谱分析识别轴承磨损、转子不平衡等故障。绝缘电阻测试仪采用高电压输出模块，自动检测电气设备绝缘性能，一旦绝缘值低于安全标准，系统立即切断电源并报警。自动化控制逻辑通过PLC或分布式控制系统（DCS）实现。传感器采集的数据经信号调理模块处理后，与预设阈值进行对比，若触发异常则启动报警程序，并联动相关设备，同时将数据上传至中央监控平台，为故障分析提供历史记录。

2.3 专用检测设备

矿用隔爆型电气设备防爆性能检测仪是保障煤矿安全的“守门人”。该设备依据GB/T3836系列国家标准，采用气压测试、火花试验等技术，对设备外壳的密封性、耐压性及内部电路的防爆性能进行严格检测。例如，通过向隔爆外壳内充入高于外界的气压，监测压力下降速率判断密封性；利用火花发生器模拟电气火花，验证设备在爆炸性环境中的安全性。检测过程需严格遵循防爆标准，确保仪器自身不成为点火源^[2]。专用检测设备还具备数据溯源功能，自动生成检测报告，为设备认证与维护提供权威依据。

3 矿用电气设备自动化检测技术应用

3.1 电动机检测技术

在煤矿生产中，电动机作为核心动力设备，其运行状态直接影响生产效率与安全。电动机检测技术聚焦于以下定子绕组温度监测与转子断条故障诊断，结合PLC控制系统实现运行状态实时巡检。（1）定子绕组温度监测。通过预埋式温度传感器实现。常见的温度传感器包括热电偶、热电阻和光纤传感器，其利用热电效应、电阻随温度变化特性或光信号衰减原理，将温度信号转换为电信号或光信号。传感器采集的数据经信号调理模块放大、滤波后，传输至PLC控制系统。PLC内置温度阈值判断逻辑，当检测温度超过设定值时，触发报警并启动降温措施，如调节通风系统或降低电机负载。（2）转子断条故障诊断主要依赖频谱分析方法。电动机正常运行时，转子电流产生的磁场具有特定频率特征，当转子出现断条故障时，磁场频谱会出现异常谐波分量。通过电流互感器采集定子电流信号，经快速傅里叶变换（FFT）算法将时域信号转换为频域信号，分析特定频率处的谐波幅值与相位变化，可精准识别转子断条故障及其严重程度。PLC控制系统根据频谱分析结果，实时调整电机运行参数或发出停机检修指令，避免故障恶化。（3）自动化系统以PLC为核心，构建电动机运行状态实时巡检网络。PLC通过Modbus、Profibus等通信协议，周期性采集温度传感器、电流互感器及振动传感器等数据，利用预设的故障诊断模型进行综合分析，并将结果上传至中央监控平台。系统支持远程参数设置与控制，实现电动机全生命周期状态管理。

3.2 电缆与输电线路检测

矿用电缆与输电线路长期处于潮湿、高负荷环境，绝缘性能下降与局部放电是常见故障隐患。自动化检测方案通过以下绝缘电阻测试与局部放电检测技术，保障电力传输系统稳定运行。（1）绝缘电阻测试。采用高电

压绝缘电阻测试仪，基于欧姆定律实现自动化检测。测试仪向电缆施加直流高压，测量回路电流并计算绝缘电阻值。自动化系统集成多路切换装置，可对多条电缆进行分时检测，数据经RS-485总线传输至控制主机。系统内置绝缘电阻标准库，通过对比实测值与标准阈值，判断电缆绝缘状态，并生成趋势分析报告，预测绝缘老化进程。（2）局部放电检测。利用高频传感器捕捉放电产生的电磁波、超声波或脉冲电流信号。高频电流传感器（HFCT）串联于电缆接地回路，检测局部放电产生的暂态电流脉冲；超声波传感器则安装于电缆接头处，接收放电产生的机械振动信号。检测信号经放大、滤波后，输入局部放电检测仪，通过分析脉冲幅值、重复率及相位分布特征，判断放电类型与严重程度。自动化系统采用分布式架构，在输电线路关键节点部署检测单元，通过物联网技术实现数据集中处理与故障定位。

3.3 防爆电气设备密封性检测

防爆电气设备的密封性是保障煤矿井下安全的关键，自动化密封性能评估依赖压力泄漏测试技术。检测流程基于压力衰减原理，通过精确控制与数据采集实现全自动化。（1）压力泄漏测试仪器。由压力源、密封夹具、压力传感器及控制单元组成。测试时，将被测设备置于密封夹具内，通过压力源充入高于环境压力的气体（通常为氮气），待压力稳定后切断气源，压力传感器实时监测内部压力变化。若设备存在密封缺陷，内部压力将随时间衰减，衰减速率与泄漏量成正比。控制单元采集压力随时间变化曲线，利用最小二乘法拟合压力衰减斜率，结合标准泄漏率公式计算泄漏量。（2）自动化评估流程。PLC控制压力充放、数据采集及测试流程切换，工业计算机运行专用评估软件，根据国家标准设定泄漏量阈值，自动判断设备密封性是否合格。系统支持多通道并行测试，具备数据存储、报告生成及不合格品自动分拣功能，大幅提升检测效率与准确性^[3]。

4 矿用自动化检测系统的硬件与软件架构

4.1 硬件组成

硬件组成主要包含以下（1）传感器阵列。针对煤矿复杂环境与电气设备检测需求进行多类型部署。在电气参数检测方面，配置电压互感器、电流互感器、霍尔传感器等，用于监测电压、电流、功率等物理量；针对设备状态监测，部署温度传感器、振动传感器、湿度传感器，实时感知设备温度变化、机械振动频率及环境湿度；在防爆性能检测场景下，压力传感器、气体浓度传感器则用于监测设备密封性与危险气体浓度。（2）数据采集模块。其核心由模拟-数字转换器、信号调理电路组

成,能够将传感器输出的模拟信号转换为数字信号,便于后续处理。为应对煤矿井下强电磁干扰环境,数据采集模块采用隔离技术,通过光电隔离、磁隔离等方式阻断干扰信号传输,同时内置滤波电路,对采集信号进行去噪处理。模块支持多通道并行采集,可实现对多路传感器数据的同步采样,确保数据的时间一致性。(3)工业控制计算机。采用加固型设计,适应煤矿井下高温、潮湿、粉尘等恶劣环境。计算机搭载多核处理器与大容量内存,满足实时数据处理与复杂算法运行需求。在功能实现上,其通过PCIe、USB等接口与数据采集模块、通信模块相连,接收传感器数据并下发控制指令;同时运行操作系统与控制软件,协调系统各部分工作,实现对检测流程的自动化控制与管理。(4)集成设计。硬件系统的集成采用分层架构模式,传感器阵列作为底层感知单元,数据采集模块负责信号转换与初步处理,工业控制计算机作为顶层决策单元,三者通过标准化接口与通信协议实现无缝连接。在物理布局上,采用控制柜集中部署方式,将数据采集模块、通信模块等集成于防爆控制柜内,确保设备安全运行,同时便于维护与管理。

4.2 软件系统功能

软件系统功能包括:(1)数据处理算法。其中FFT频谱分析算法在故障诊断中发挥关键作用。通过对采集的时域信号进行FFT变换,可将信号分解为不同频率成分,进而分析设备运行的频谱特征。如对电动机电流信号进行频谱分析,能够识别转子断条、轴承故障等产生的特征谐波。系统还采用数字滤波算法对原始数据进行平滑处理,去除噪声干扰;运用小波分析算法实现对信号的多尺度分解,提高故障特征提取的准确性。(2)故障诊断专家系统。知识库通过收集煤矿电气设备故障案例、专家经验及行业标准,建立故障特征与原因的对应关系;推理机制采用正向推理、反向推理等策略,根据采集数据与知识库进行匹配分析,实现故障类型判断、原因定位及处理建议生成。(3)人机交互界面(HMI)与远程监控平台搭建。人机交互界面(HMI)采用图形化设计,以直观的界面展示设备运行状态、检测数据及故障信息。用户可通过HMI进行参数设置、检测流程控

制及历史数据查询。远程监控平台基于B/S或C/S架构搭建,支持多用户同时访问。

4.3 通信协议与系统兼容性

通信协议与系统兼容性包含:(1)MODBUS协议应用。在系统中,工业控制计算机作为主站,数据采集模块、智能仪表等作为从站,通过RS-485或以太网接口实现连接。MODBUS协议定义了标准的数据帧格式与功能码,主站通过发送查询指令获取从站数据,从站响应指令返回数据或执行操作。(2)CANopen协议应用。CANopen协议适用于设备间的分布式通信,在煤矿检测系统中常用于传感器节点与控制单元的连接。该协议基于CAN总线技术,具备高抗干扰性与实时性,支持多主通信模式。CANopen协议定义了设备模型、通信对象及服务,实现设备的即插即用与互操作性。(3)系统兼容性。为实现不同厂商设备与系统的兼容,采用标准化通信协议与接口规范。在硬件层面,遵循工业标准接口设计,如RS-485、以太网接口等,确保设备间物理连接的兼容性;在软件层面,采用统一的数据格式与通信协议,通过中间件技术实现不同协议的转换与数据交互^[4]。

结束语:本研究系统构建了工业电气仪器仪表自动化控制技术在煤矿领域的应用体系,实现了从理论分析到工程实践的跨越。通过对检测技术、系统架构的研究,为煤矿电气设备智能化管理提供了技术框架与实施策略。但面对井下复杂环境与设备多样性挑战,未来需进一步优化传感器抗干扰性能,深化人工智能算法应用,提升系统兼容性与可扩展性。

参考文献

- [1]王振宇.工业电气仪器仪表自动化控制[J].仪器仪表用户,2024,31(4):36-38.
- [2]林健.工业电气自动化仪器仪表控制研析[J].科技资讯,2024,22(15):78-80.
- [3]汤飞.工业电气自动化仪器仪表控制研析[J].自动化应用,2023,64(5):176-178,182.
- [4]魏洪云.工业电气自动化仪器仪表控制探讨[J].中国金属通报,2021(4):259-260.