

基于物联网技术的煤矿智能化生产系统设计

李瑞龙¹ 雷晨旭¹ 杨建华¹ 袁斌²

1 陕西涌鑫矿业有限责任公司安山煤矿

2 西安开轩自动化有限责任公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21069

[摘要] 本文针对煤矿井下复杂工况存在的感知精度不足、通信稳定性差以及决策滞后等问题,基于物联网技术设计煤矿智能化生产系统。系统采用云边端协同物理架构和感知、传输、平台、应用四层逻辑架构,通过集成5G专网与工业万兆环网实现低时延高可靠传输,部署多参量本安型传感器完成环境、设备、人员等多源信息融合,构建IIoT大数据平台支撑日均8万余条数据处理,实现智能化综采协同控制、通风瓦斯联动、设备预测性维护及人员精准定位等应用。

[关键词] 物联网(IoT); 煤矿智能化; 云边端协同; 5G专网; 多源信息融合; 智能预警

中图分类号: TD82 **文献标识码:** A

Design of an IoT-Based Intelligent Production System for Coal Mines

Ruilong Li¹ Chenxu Lei¹ Jianhua Yang¹ Bin Yuan²

1 Shaanxi Yongxin Mining Co., Ltd. Anshan Coal Mine

2 Xi'an Kaixuan Automation Co., Ltd.

[Abstract] This paper addresses the issues of insufficient perception accuracy, poor communication stability, and delayed decision-making in the complex underground environment of coal mines. An intelligent production system for coal mines is designed based on IoT technology. The system adopts a cloud-edge-device collaborative physical architecture and a four-layer logical architecture comprising perception, transmission, platform, and application layers. By integrating a 5G private network with an industrial gigabit ring network, low-latency and highly reliable transmission is achieved. Multi-parameter intrinsically safe sensors are deployed to enable multi-source information fusion of environmental, equipment, and personnel data. An IIoT big data platform is constructed to support the processing of over 80,000 data items per day, enabling applications such as intelligent fully mechanized mining coordination, ventilation and gas linkage, predictive equipment maintenance, and precise personnel positioning.

[Key words] Internet of Things (IoT); coal mine intelligence; cloud-edge-device collaboration; 5G private network; multi-source information fusion; intelligent early warning

引言

国内煤炭资源地质条件复杂,井下作业环境长期存在高尘、高湿、空间受限、工况频繁变动等客观状态。现有煤矿生产体系在感知精度、通信稳定性、决策智能化层面存在技术局限,各环节数据彼此孤立,不同业务系统集成度偏低,灾害响应环节存在明显滞后^[1]。IoT技术具备全域感知、泛在连接、智能数据处理的技术属性,这类技术特征能够对应煤矿井下复杂工况所处的智能化改造场景,贴合现场实际运行环境与应用场景的基本情况。

1 系统总体架构设计

1.1 云边端协同架构

煤矿井下工况复杂,现场数据体量庞大,采掘设备远程操控业务具备高实时性特征,传统单一云中心数据处理模式无法适配井下作业运行状态。系统物理架构分为端设备智能感知层、边缘侧智能计算层、云平台智能管控层。端设备层布设各类矿用传感器、智能终端,开展原始工况数据采集。井下区域布设边缘计算节点,完成多源数据汇聚、本地实时运算、预警信息输出。

1.2 四层系统逻辑架构

依托云边端物理架构,系统依据功能属性划分为感知层、传输层、平台层、应用层四类逻辑层级。感知层作为数据采集终端载体,部署各类本安型监测传感器,采集人员、设备、环境相关数据。传输层以5G专网为核心,工业以太环网作为骨干传输链

路, WiFi 6作为补充通道, 实现井下各类数据跨层级传输。平台层采用IIoT架构, 开展多源异构数据的接入、规整、存储、运算与可视化展示^[2]。应用层对接平台数据接口与算法模型, 搭载协同控制、安全联动监测、设备状态研判、生产调度管控等功能模块。

1.3 系统设计核心指标

系统设计参照国内煤矿智能化建设现行行业标准, 各层级明确核心技术参数。感知层瓦斯浓度测量误差 $\leq 0.10\%$, 矿压测量误差 $\leq 1.5\%$ 满量程。传输层核心控制命令端到端时延 ≤ 20 ms, 单基站覆盖距离 ≥ 600 m。平台层可接入子系统数量 ≥ 20 个, 监测测点 ≥ 2 万个, 数据处理速率 ≥ 20 万条/s。各项技术参数按层级逐一划定, 分别对应设备检测、指令传输、数据处理相关指标内容, 参数数值依照行业规范完成设定, 覆盖系统运行各环节基础指标范畴^[3]。

2 感知层设计与传感器部署

2.1 多参量监测传感器选型与部署

井下感知设备统一采用本安型防爆结构, 适配井下高湿、高尘、高频振动的作业环境。环境安全类监测终端包含瓦斯、一氧化碳、氧气、粉尘、温湿度传感器。激光式甲烷传感器量程0~100%VOL CH₄, 测量误差 $\leq 0.10\%$ CH₄, 直流工作电压9.0~25.0V, 工作电流 ≤ 30 mA。电化学一氧化碳传感器量程0~1000 ppm, 响应时间 ≤ 35 s。光散射式粉尘浓度传感器量程0.1~1000 mg/m³, 测量相对误差 $\leq \pm 25\%$ 满量程, 采样流量2.0 L/min。顶板矿压监测使用搭载LoRa无线通信的本安型压力传感器, 设备安装于液压支架立柱油路位置, 量程0~60 MPa, 测量精度 $\pm 1.5\%$ 满量程, 无线通信距离 ≥ 100 m, 采用3.6V锂电池供电, 工作电流 ≤ 50 mA, 单次充电连续工作时长 ≥ 90 d。机电设备状态监测终端分布在采煤机、刮板输送机、主通风机、提升机的关键点位。

2.2 感知层关键技术参数汇总

感知层各类传感器设置差异化采样频率, 环境参数采样频次为1次/s, 设备状态参数采样频次为10次/s, 应急安全关键参数采样频次为50次/s, 边缘计算节点对高频采集数据开展本地缓存与特征提取操作, 上行数据统一按照1次/s的频次向外传输, 信道数据传输负载下降75%。激光甲烷传感器监测瓦斯浓度CH₄, 量程范围0~100% VOL, 测量误差 $\leq 0.10\%$ CH₄, 安装于采煤机附近、回风巷、上隅角; 电化学CO传感器监测一氧化碳CO, 量程范围0~1000 ppm, 响应时间 ≤ 35 s, 安装于运输巷道、机电硐室、采空区回风; 粉尘浓度传感器监测总粉尘PM, 量程范围0.1~1000 mg/m³, 测量精度 $\pm 25\%$ FS, 安装于采煤机下风口、转载点、掘进面。

3 传输层网络架构与通信方案

3.1 5G专网与工业环网融合组网

系统采用矿用5G独立专网SA与工业万兆以太网环网融合架构, 5G核心网布设在矿区本地数据中心, 数据存储与传输区域划定在矿区内部。井下巷道、工作面布设本安型5G PRRU基站, 采用2.1 GHz、3.5 GHz双频组网。3.5 GHz频段单基站覆盖半径43.8

m, 2.1 GHz频段单基站覆盖半径77.6 m。骨干传输层采用SPN 50G承载网环形拓扑, 网络带宽50 Gbps。系统设置1D3U帧结构, 5G网络上行带宽 ≥ 700 Mbps, 业务端到端平均时延 ≤ 20 ms, 部分作业场景链路时延为6 ms。

3.2 网络覆盖与性能指标

井下无遮挡巷道环境中, 单5G基站覆盖范围为600~800 m, 单基站可实现128对及以上用户同时接入。系统搭载900 MHz窄带物联网(NB-IoT)接入模式, 该接入模式可对接井下各类低功耗传感器终端, 适配此类终端的数据传输场景, 能够与井下低功耗监测终端的接入规格相匹配, 适配井下多样化终端的基础接入配置^[4]。

表1 5G专网核心性能参数表

参数项	技术指标	说明
组网架构	5G SA 独立专网	核心网矿内本地部署, 数据不出矿
双频覆盖	3.5 GHz: 43.8 m/2.1GHz: 77.6 m	PRRU 单站覆盖半径
上行带宽	≥ 700 Mbps	1D3U 帧结构优化配置
端到端时延	< 20 ms / 特定场景 < 6 ms	适配采掘设备远程操控业务
单基站覆盖	600~800 m	巷道无遮挡工况条件
骨干环网带宽	50 Gbps	SPN 万兆承载环网架构
NB-IoT 接入	900 MHz 支持	适配低功耗传感器物联接入

3.3 通信服务质量保障机制

传输层采用服务质量QoS分级管控模式, 依托网络切片技术分割物理网络, 划分出5G承载切片、工控业务切片、视频回传切片、监测数据切片, 不同切片的带宽资源相互隔离。工控业务切片设定为最高优先级, 面向低时延控制业务。井下变电所、采区集中控制点布设边缘计算节点, 远程操控指令经由边缘节点直接转发至现场执行机构, 指令传输时延处于10 ms以内。网络节点依照现场点位完成布设, 各类业务数据分别在对应切片内完成传输。

4 平台层架构与数据处理

4.1 智能一体化管控平台架构

平台层依托IIoT架构布设煤科云一体化管控载体, 可对接矿井生产、安全、管理领域各类子系统, 适配20类以上子系统与2万个以上监测测点, 接入数据包含感知终端数据、视频流数据、设备状态数据、地质工况数据等异构信息。平台划分为数据接入层、数据处理层、业务呈现层。数据接入层配备标准化交换协议与API接口, 完成各类子系统数据格式转换。实测工程数据显示, 平台搭载187类API数据接口, 覆盖10327个IT、OT设备实时数据字段, 日均规整处理8万余条各类数据。

4.2 大数据处理架构与性能参数

数据处理层采用Hadoop分布式架构, 借助Kafka消息队列完成系统间数据交互, 单节点消息吞吐速率 ≥ 10 万条/s。采掘设备运行过程中产生海量时序数据, 单台采煤机每秒生成数千个数据点, 单工作面日均数据量为TB级别。平台搭载时序数据库

TSDB, 数据查询响应时长为毫秒级, 存储资源占用量为传统数据库的20%^[5]。平台整体数据处理速率 ≥ 20 万条/s, 数据访问延迟 ≤ 1 s。边缘节点设置改进BP神经网络异常检测模块, 采集设备振动、温度、电流等运行参数, 开展本地数据筛选, 仅上传异常数据与核心生产指标。

5 应用层功能设计与实现

5.1 智能化综采工作面协同控制

采煤机搭载本安型5G通信终端与惯性导航定位模块, 可开展4.5m采高截割作业。液压支架装配电液控调速换向阀, 配合采煤机运行动作。系统包含记忆割煤、支架跟机移架、远程集控三类运行模式。采煤机参照历史截割轨迹与实时煤层参数改动作业参数, 液压支架依照采煤机实时位置, 执行降柱、移架、升柱、刮板输送机推移等动作。采煤机与液压支架依托5G低时延链路实现毫秒级数据交互, 系统结合采煤机行走速度、滚筒位置, 对应设置液压支架跟机数量、动作时序、供液压力, 适配三角煤截割等特殊作业场景。

5.2 智能通风与瓦斯抽采联动系统

通风监测网络设置于采掘工作面、回风巷道以及通风机站区域, 实时采集瓦斯浓度、风速、风压、温度等井下环境参数, 依托通风网络解算模型开展各类参数的动态运算处理。矿井装设TLT主通风机, 该设备最高运行效率为89%, 处于全工况运行状态时, 运行效率不低于86%。瓦斯抽采系统配备变频调控装置, 参照采空区瓦斯涌出数据调整抽采负压与流量, 通风系统同步对工作面的风量、风压分布参数进行相应改动, 各单元参数随井下现场数据同步发生变化。

5.3 机电设备预测性维护与故障预警

采煤机截割部、主通风机轴承、刮板机链轮等设备核心点位布设振动、温度监测传感器, 传感器实时采集各类设备的运行状态信号。系统采用长短期记忆网络时序分析算法, 针对获取的振动波形数据开展阶比分析、包络解调、多维阈值比对, 设置设备故障识别模型。模型纳入油液磨粒成分、电流谐波频谱、温度变化率等多维度数据, 数据相互结合, 覆盖齿轮磨损、轴承疲劳、电机转子断条等不同类型的设备故障识别场景, 所有监测数

据均按固定形式录入模型体系。

6 结语

本文基于IoT技术, 从四层功能架构维度开展煤矿智能化生产系统整体设计, 明确云边端协同物理架构、5G与工业环网融合通信模式、IIoT大数据处理方式以及多类智能化应用模块配置。系统整体架构覆盖煤矿采掘、安全、运维全作业流程, 各层级都配置固定技术参数与硬件布设方案, 能作为矿井数字孪生搭建、井下多智能体协同控制、边缘AI模型轻量化研究的基础参考。

[参考文献]

- [1]贾兴会.煤矿安全监测监控系统难点与对策应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(21):103-105.
- [2]翟大臣,刘立业,贾宁,等.基于物联网的煤矿智能化生产设备系统设计[J].信息记录材料,2025,26(8):172-174.
- [3]王海军,付建伟.信息化和智能化技术在煤炭行业生产和安全管理中的应用[J].数字通信世界,2024,(11):141-143.
- [4]贾林杰.数字化煤矿安全监测监控系统的应用分析[J].西部探矿工程,2024,36(11):122-124.
- [5]龙明举.煤矿智能化建设实践及关键技术研究[J].煤炭新视界,2024,(1):272-274.

作者简介:

李瑞龙(1988--),男,汉族,陕西省宝鸡市人,本科,西安电子科技大学,助理工程师,现就职于:陕西涌鑫矿业有限责任公司安山煤矿研究方向:机电运输、信息化、电气工程及其自动化。

雷晨旭(1996--),男,汉族,陕西省渭南市人,本科,毕业院校:长安大学兴华学院,职称:助理工程师,现就职于:陕西涌鑫矿业有限责任公司安山煤矿,研究方向:矿山机电。

杨建华(1983--),男,汉族,陕西省渭南市人,本科,毕业院校:西安工程大学,职称:助理工程师,现就职于:陕西涌鑫矿业有限责任公司安山煤矿,研究方向:矿井供电,具体备注:煤矿智能化供电。

袁斌(1971--),男,汉族,上海市人,单位(学校具体到二级学院):西安开轩自动化有限责任公司,研究生,职称:工程师,研究方向:自动化控制。