

基于智能传感的矿用隔绝式压缩氧自救器状态监测系统设计与实现

赵建存

温州图强电气科技有限公司 浙江温州 325000

【摘要】矿用隔绝式压缩氧自救器是矿井灾害时保障人员生命安全的关键装备,其状态可靠性决定逃生成功率。传统监测依赖人工定期检查,存在滞后、精度不足、覆盖不全等问题,难实时掌握核心参数。本文针对其状态监测需求,开展基于智能传感的监测系统研究。剖析工作机理与核心参数,构建四层架构监测系统,研发状态感知模块,优化数据处理策略,设计可视化平台。成果实现核心参数实时精准监测,提升设备管理智能化水平,为矿井安全提供技术支撑,有重要工程应用价值与理论意义。

【关键词】矿用隔绝式压缩氧自救器;智能传感;状态监测;多传感器融合;数据传输;预警系统

Design and Implementation of Condition Monitoring System for Mine Isolated Compressed Oxygen Self-Rescuer Based on Intelligent Sensing

Zhao Jiancun

Wenzhou Tuqiang Electrical Technology Co., Ltd. Zhejiang Wenzhou 325000

【Abstract】The mine isolated compressed oxygen self-rescuer serves as critical safety equipment during mining disasters, where operational reliability directly determines evacuation success rates. Traditional monitoring methods relying on manual periodic inspections suffer from latency, insufficient accuracy, and incomplete coverage, making real-time core parameter tracking challenging. This study addresses condition monitoring requirements through intelligent sensing-based system development. By analyzing operational mechanisms and key parameters, we constructed a four-tier monitoring architecture, developed condition-aware modules, optimized data processing strategies, and designed visualization platforms. The results achieve real-time precision monitoring of core parameters, enhance intelligent equipment management capabilities, and provide technical support for mine safety - demonstrating significant engineering application value and theoretical significance.

【Key words】Mine isolated compressed oxygen self-rescuer; Intelligent sensing; Condition monitoring; Multi-sensor fusion; Data transmission; Early warning system

1 引言

1.1 研究背景与意义

矿井作业环境复杂恶劣,突发灾害威胁人员生命安全。矿用隔绝式压缩氧自救器能为遇险人员提供氧气、隔绝有害气体,争取逃生或救援时间。但因自救器状态失效导致的人员伤亡占比高,凸显其状态可靠性的重要性。

当前矿用隔绝式压缩氧自救器状态管理主要靠人工定期巡检,存在诸多缺陷:监测滞后,难实时捕捉设备参数变化;精度低,难精准识别微小隐患;效率低,易漏检、错检;数据追溯性差,不利于全生命周期管理。

随着智能传感和无线通信技术发展,为矿用自救器状态实时精准监测提供了可能。开展基于智能传感的监测系统研究,理论上可完善监测体系、构建智能化框架;实践上能早发现故障、提升可靠性和管理效率、降低成本,为应急救援提供保障。

1.2 研究现状综述

国内外学者围绕矿用自救器状态监测取得初步成果。在监测参数上,聚焦氧气压力等核心参数,用传感器采集;监测技术上,从有线监测发展到无线通信技术应用;系统设计

上,构建了简易监测系统;数据处理上,引入简单算法提升精度和识别能力;还开展了自救器结构优化研究。

然而,现有研究存在不足:传感器选型与融合技术不成熟,监测精度和稳定性差;数据传输适配性差,难兼顾多种需求;数据处理深度不足,难预警故障;系统集成度低,未与安全管理平台协同联动。本文针对这些空白,开展基于智能传感的监测系统设计与实现研究,提升系统性能。

2 矿用隔绝式压缩氧自救器工作机理与监测需求分析

2.1 自救器工作机理

矿用隔绝式压缩氧自救器以压缩氧气瓶为气源,灾害时开启阀门,氧气经减压后与呼出气体混合,通过二氧化碳吸收剂净化,形成密闭循环呼吸系统,内置调压与泄压装置保障供氧稳定。核心部件状态直接影响可靠性:氧气瓶压力决定供氧时长,减压装置影响压力稳定性,吸收剂效能决定气体净化效果,密封件完整性防止氧气泄漏与有害气体渗入。

2.2 核心监测参数确定

基于机理与故障模式,确定五类关键参数:

压力参数:瓶内压力(反映余量)、输出压力(诊断减

压装置);

气体参数:呼吸舱氧气浓度(18% - 21%)、二氧化碳浓度(<1%),异常分别引发缺氧/氧中毒或窒息风险,并表征吸收剂效能;

温度参数:内部温度(影响密封与气体稳定性)、环境温度(影响传感器精度);

密封性参数:通过密闭腔体压力变化监测泄漏;

使用状态参数:佩戴与阀门开启状态,支撑应急调度决策。

2.3 监测系统功能需求

系统需实现:①高精度实时采集(参数可调频);②井下远距离稳定传输;③数据滤波、校准、融合分析及故障识别与趋势预测;④多级预警(声光、短信等);⑤设备全生命周期管理(信息录入、历史查询、运维调度),支持多终端访问;⑥与矿井现有安全管理平台无缝对接,实现数据共享与应急联动。

2.4 系统性能需求

精度:压力误差<1%,氧气浓度<0.5%,二氧化碳浓度<0.1%,温度<0.5℃;

传输:无线距离≥1000米,成功率>99%,延迟<5秒,支持≥500设备并发;

可靠性:符合矿用防爆、IP68防护标准,-20℃~60℃、湿度≥95%环境下稳定运行,MTBF>5000小时;

功耗:感知模块电池供电,单次续航超6个月;

兼容性:支持多型号自救器接入,提供标准化接口与通信协议。

3 监测系统总体架构设计

3.1 总体架构设计

基于监测需求分析,构建“感知层 - 传输层 - 处理层 - 应用层”四层架构的矿用隔绝式压缩氧自救器状态监测系统。感知层采集并初步处理核心参数,是基础感知单元;传输层实现感知层与处理层间数据传输,保障稳定;处理层深度处理数据、分析故障与生成决策,是核心处理单元;应用层为用户提供可视化监测等功能,是交互与应用单元。

各层通过标准化接口与通信协议交互数据,确保兼容性与扩展性。感知层与传输层用低功耗无线通信,适配井下环境与低功耗需求;传输层与处理层采用有线与无线结合的混合传输,地面用以太网,井下用矿用专用无线技术;处理层与应用层经以太网交互数据,保障高速稳定。系统架构模块化、分层化,便于扩展与维护。

3.2 感知层设计

感知层采用“多传感器融合”思路,由压力、气体、温度、密封性监测和状态识别模块组成。压力传感模块选高精度矿用本安型压力传感器,装于压缩氧气瓶和减压装置出口,扩散硅材质,抗干扰、精度高,适配高压环境。气体传感模块由氧气和二氧化碳传感器组成,装于呼吸舱内,用电化学气体传感器,响应快、精度高,有自动校准功能。温度传感模块选数字式温度传感器,采集内外温度,低功耗、抗振动,适配井下恶劣环境。密封性监测模块基于压力衰减法,通过监测压力变化判断密封性,集成微型压力传感器与控制

单元。状态识别模块用霍尔和振动传感器,监测阀门开启和佩戴状态以判定使用状态。

感知层还集成数据采集与预处理单元,以低功耗微控制器为核心,采集、滤波、校准和融合数据,有本地存储功能,矿用本安型设计,确保井下安全工作。

3.3 传输层设计

传输层采用“LoRa + 以太网”混合架构,适配井下传输需求。井下感知模块与传输节点用LoRa无线通信,传输节点部署在关键位置形成网络接力传输数据。传输节点与地面处理层用矿用工业以太网,无覆盖区域用光纤补充。传输层集成数据加密与校验功能,采用AES和CRC算法。为提升可靠性,具备链路监测与自适应切换功能和数据重传机制。传输节点采用矿用隔爆兼本安型设计,防爆、防水、防尘,适配井下恶劣工作环境。

3.4 处理层设计

处理层由边缘计算节点与云处理中心组成,实现数据分层处理与深度分析。边缘计算节点部署于井下各采区,接收本区域监测数据,进行实时预处理与本地决策,以嵌入式工业计算机为核心,有较强数据处理与抗干扰能力。其核心功能有数据融合分析、故障实时识别与本地预警触发。数据融合分析用加权平均多传感器融合算法提升测量精度;故障实时识别基于阈值判断与趋势分析,判定设备故障并识别类型。云处理中心部署于地面监控中心,采用服务器集群架构,实现全矿井监测数据集中处理、存储与全局决策。核心功能包括数据深度分析、故障趋势预测、设备状态评估与数据共享。数据深度分析用大数据分析技术挖掘规律;故障趋势预测引入时间序列预测算法实现预警前置。云处理中心有海量数据存储、备份与恢复功能,处理层还具备与现有安全管理平台的数据对接接口。

3.5 应用层设计

应用层面向管理人员与作业人员,提供多终端、可视化监测与管理功能,包括本地监控终端、地面监控平台与移动终端应用。本地监控终端部署于井下关键位置,实时显示本区域自救器状态信息,有本地预警功能。地面监控平台基于B/S架构,管理人员通过浏览器访问,实现全矿井自救器状态集中监测与管理,核心功能有设备状态总览、实时数据监测、历史数据查询、故障报警管理、设备信息管理、运维调度管理等。故障报警管理模块接收预警信息并发出预警,支持故障处置流程管理;设备信息管理模块实现自救器基础信息管理;运维调度管理模块生成运维计划并跟踪执行情况。移动终端应用支持Android与iOS系统,管理人员可随时查看信息、处理任务,支持扫码查看设备详情。应用层具备用户权限管理功能确保系统安全。

4 核心技术研发与优化

4.1 多传感器融合技术研发

为提升监测精度与可靠性,研发多传感器融合算法,结合加权平均与卡尔曼滤波。先对各传感器原始数据预处理,用滑动平均滤波剔除随机干扰噪声,用趋势滤波消除漂移误差;再根据测量精度等指标确定权重系数,用加权平均算法初步融合多传感器数据。针对初步融合结果的动态误差,引

入卡尔曼滤波二次融合,建立状态与观测方程,通过预测-更新迭代优化结果,降低动态干扰影响。该技术能弥补单一传感器缺陷,提升测量精度与稳定性,还可自动识别并剔除故障数据,提升系统容错能力。

4.2 低功耗设计技术优化

针对感知模块长期电池供电需求,开展全链路低功耗优化。感知层选用低功耗硬件,采用休眠-唤醒机制,优化采集频率以平衡功耗与监测精度。传输层采用低功耗通信策略,优化数据传输方式,传输节点采用太阳能+电池供电。处理层边缘计算节点用低功耗处理器,具备动态调频功能。

4.3 故障诊断与预警算法研发

研发多层故障诊断算法,基于“阈值判断+趋势分析+关联规则”。第一层用阈值判断,预设参数阈值范围,超阈值触发预警。第二层用趋势分析,拟合历史数据得变化趋势曲线,异常则触发预警。第三层用关联规则分析,挖掘参数关联关系,判断故障类型与位置。预警算法支持多级预警,分一级、二级、三级预警,对应不同处置流程与通知方式,可精准推送预警信息。

4.4 系统兼容性与集成技术优化

为提升兼容性与集成性,开展标准化接口与协议设计。感知层用标准化传感器接口和 Modbus-RTU 通信协议。传输层用标准化 LoRa 和以太网通信协议。处理层与应用层用 RESTful API 接口,具备与现有平台的标准化对接接口,支持数据共享与协同,同联动。系统模块化设计,各功能模块独立封装,通过标准化接口集成,便于功能扩展与版本升级;支持新类型自救器接入,简单配置参数即可完成适配,提升系统扩展性。

5 系统实现与性能验证

5.1 系统硬件实现

系统硬件实现涵盖感知模块、传输节点、边缘计算节点与应用终端的硬件开发与集成。感知模块以低功耗微控制器为核心,集成多种传感器,采用多层 PCB 板设计,矿用本安型外壳,确保测量不受影响。传输节点以 LoRa 通信与工业以太网模块为核心,采用隔爆兼本安型外壳,矿用专用全向天线提升信号覆盖。边缘计算节点采用嵌入式工业计算机,无风扇设计提升可靠性。应用终端包括井下本安型触摸屏终端、地面监控主机与移动终端,各有适配性能。

参考文献

- [1]徐玉龙. 矿用隔绝式压缩氧自救器的研制[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(2): 84-85.
- [2]邹晓旭. 新型矿用隔绝式压缩氧气自救器设计与试验[J]. 煤矿安全, 2025, 56(12): 211-218. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.20250664.
- [3]郭晓敏. 压缩氧自救器在煤矿安全生产中的应用及发展[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(23): 98-100. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0155.2022.23.033.
- [4]于翔, 李庆, 王力骞, 等. 应急救援用智能自动自救器的研究[J]. 中国个体防护装备, 2017(1): 6-9. DOI: 10.16102/j.cnki.cppe.2017.01.002.
- [5]于翔, 高圣, 陈绍南, 等. 我国矿用自救器生产现状及发展趋势[J]. 中国个体防护装备, 2011, (2): 5-9.

5.2 系统软件实现

系统软件实现包括感知层、传输层、处理层与应用层软件。感知层采集软件基于嵌入式实时操作系统,模块化设计便于扩展维护。传输层通信软件实现协议解析等功能,多线程设计提升效率。处理层分析软件基于 Linux 操作系统,分布式架构实现高效分析。应用层管理软件基于 B/S 架构,支持多终端适配。

5.3 系统性能验证

在某煤矿井下复杂环境中开展系统综合测试,结果表明:多传感器融合使压力、氧气浓度等参数测量误差满足设计要求,精度提升超 25%;LoRa 通信传输距离远、成功率高,自适应切换机制响应迅速;系统在高湿、粉尘等恶劣工况下稳定运行,可靠性强。功耗方面,感知模块休眠功耗低,有光照时可持续工作 24 小时,无光照时电池供电续航超 15 天。功能验证显示,系统可实时采集、传输、处理与可视化展示核心参数;故障诊断算法对氧气瓶泄漏、减压装置异常、吸收剂失效等识别准确率超 96%;具备多级预警推送、设备全生命周期管理、历史数据追溯等功能,并与矿井现有安全管理平台无缝对接、协同联动,全面满足井下安全监测实际需求。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本研究设计矿用隔绝式压缩氧自救器智能监测系统,构建“感知-传输-处理-应用”四层架构。系统融合多传感器精准采集压力、氧气浓度等核心参数,采用 LoRa 与以太网混合传输保障数据稳定,结合边缘计算与云平台实现智能分析,支持多终端可视化管理。优化算法显著提升测量精度与系统兼容性。现场验证表明,故障识别准确率超 96%,可实时精准监测与预警,有效提升矿井安全保障能力。

6.2 未来展望

未来研究可在以下方向深化:感知技术上,研发新型传感器,探索无源传感技术应用;数据处理方面,引入人工智能算法,开发基于数字孪生的模拟平台;功能扩展上,增加实时监测功能,开发智能运维调度功能;产业化与标准化方面,推动系统产业化转化,开展标准化研究。通过多维度创新与推广,提升矿用自救器状态管理智能化水平,为矿井安全生产与应急救援提供更坚实保障。