

基于物联网的矿井安全系统设计研究

蔡志芳

江西财经大学 江西南昌 330000

摘要: 本文以安全优先、精准监测、智能预警、便捷管理为核心指导思想,设计一种基于物联网的矿井安全系统。系统采用物联网分级架构设计,集成温湿度传感器、甲烷浓度传感器等硬件设备,结合Java技术、STM32单片机、多终端交互界面,为作业人员提供实时安全保障,为管理部门提供科学决策依据,降低事故发生率,保障人员生命与设备财产安全。

关键词: 物联网; 矿井安全系统; 架构; 需求; 功能模块

前言

矿井开采作业环境复杂、空间封闭,易引发瓦斯爆炸、顶板坍塌、中毒窒息等安全事故,严重威胁作业人员生命安全。传统矿井安全监测手段存在响应滞后、维度单一、数据传输不稳定等问题,难以满足现代矿井安全管理精细化需求。基于此,本文以物联网技术为核心,将“精准感知、稳定传输、智能应用”作为核心目标,设计一款矿井安全系统,提升矿井安全管理质量。

一、基于物联网的矿井安全系统架构与需求分析

(一) 系统架构

本系统功能架构如图1所示。硬件层面,集成以下核心模块:①环境监测模块。部署温湿度传感器(DHT11)与可燃气体传感器(MQ-2),分别用于监测矿井内的温湿度变化,评估作业环境舒适度;辨别甲烷等有害气体浓度,保障呼吸安全;为地质结构稳定性分析提供间接决策支撑;②控制与通信模块。以STM32单片机作为主控制器,负责数据采集、预处理及设备联动。通过Wi-Fi/ZigBee通信协议将数据传输至云平台,完成与移动终端的实时交互;③预警执行模块。配备蜂鸣器等声光报警装置,结合黄/橙/红多级阈值报警等级设定,实现超标数据的即时预警与通风设备联动控制^[1]。

软件层面,基于Java与Vue框架开发的可视化平台提供以下功能:①数据可视化。动态展示温湿度、气体浓度等参数的实时曲线与历史趋势。②智能报警管理。

基金项目: 江西财经大学大学生创新创业训练计划项目资助,项目编号: D202510111620118657

作者简介: 蔡志芳(2004.08--),女,汉族,江西抚州人,本科,研究方向:软件工程。

自动触发报警并记录事件,支持报警阈值自定义配置。③用户权限管理。分角色控制数据访问与设备操作权限,保障系统安全性,避免数据泄露。

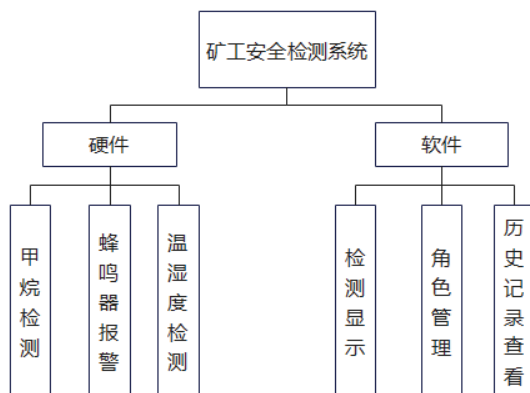


图1 基于物联网的矿井安全系统功能架构图

(二) 需求分析

1. 功能需求分析

温湿度与可燃气体浓度实时采集,采集频率不低于1次/秒,测量范围0~50℃、20%~90%RH,甲烷浓度0~100%LEL,保证对矿井内环境变化的敏锐捕捉;当监测参数超出预设阈值(温度 $\geq 35^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 85\%\text{RH}$ 、甲烷浓度 $\geq 1.0\%$)时,系统在1s内触发蜂鸣器本地报警,并向移动端与Web端推送报警信息;支持多终端数据访问与历史数据追溯,其中存储数据周期不低于1年,以使用户对矿井环境变化进行长期跟踪与分析;提供账号创建、权限分配、密码修改等功能,提升系统安全性与易用性,确保用户能够根据其职责与需求访问相应的系统功能与数据。

2. 性能需求分析

性能需求聚焦技术、经济、社会可行性、数据采集、传输实时性、系统运行可靠性及稳定性。采用成熟的技

术与架构, 确保数据采集、传输、处理、显示能顺利进行; 在保障系统性能的前提下, 需充分考虑成本效益, 选择性价比高的硬件设备与软件平台, 降低系统建设与运维成本; 符合国家相关标准与规范, 应用后能切实降低事故率, 提升社会安全保障水平; 具备良好的可扩展性与可升级性, 以适应未来矿井安全管理需求的变化; 传感器采集数据经处理后能在3s内传输至应用层并完成显示; 复杂电磁环境下, 数据传输成功率不低于99.5%; 系统连续无故障运行时间不低于720h, 平均故障修复时间不超过30min。

表1 硬件模块连接关系及功能简介

模块名称	核心元器件	连接接口	功能说明
单片机模块	STM32F103RCT6	GPIO、USART、ADC	数据处理、模块控制、数据传输
温湿度模块	DHT11 传感器	单总线接口 (GPIO)	温湿度数据采集与传输
传感器模块	MQ-2 气敏元件	模拟量接口 (ADC)	可燃气体、烟雾浓度采集
通信模块	ESP8266	USART接口	数据无线传输
报警模块	有源蜂鸣器	GPIO接口	参数超标时声光报警

1. DHT11 温湿度测量模块

本系统使用DHT11同时测量环境温度与相对湿度, 测量范围0~50℃、20% ~ 90%RH。工作时, STM32单片机通过GPIO口向DHT11发送启动信号, 传感器响应后将其转换为包含湿度整数部分、湿度小数部分、温度整数部分、温度小数部分及校验和的40位数字信号。随后单片机对信号进行解析与校验, 得到更精准的温湿度数据。为提升测量稳定性, 在传感器数据引脚与电源引脚之间并联4.7KΩ上拉电阻, 减少信号干扰, 并采取单总线数字接口, 简化硬件电路设计, 减少布线复杂度。

2. MQ-2 烟雾传感器模块

本系统使用MQ-2检测甲烷、乙烷等可燃气体, 以及烟雾等有害气体浓度, 检测范围100~10000ppm, 工作电压5V。工作时, 与微控制器或其他电子设备配合使用。当其感受到目标气体存在, 基于金属氧化物半导体(MOS)气敏原理, 通过敏感材料表面吸附气体分子后电导率的变化实现气体浓度检测, 确定目标气体浓度。

为提升矿井复杂环境下的检测可靠性, 规避粉尘、温湿度波动等干扰因素引发的误报警, 传感器模块内置精密可调电位器, 通过调节电位器阈值实现检测灵敏度的精准校准。如矿井甲烷爆炸下限(LEL)为5%时, 传感器报警阈值校准至甲烷浓度1.0%LEL对应的电压信号值, 确保预警准确、及时; 考虑到半导体气敏传感器存在上电初始漂移特性, 传感器上电后预热2分钟再进行数据采集, 消除初始漂移对测量结果的影响; 考虑到MQ-2只能检测特定类型气体, 不具备区分不同气体的

3. 安全需求分析

安全需求包括数据安全与设备安全, 数据传输过程采用AES加密算法保障数据不被篡改或窃取; 设备须具备防电磁干扰、防尘防水能力, 防护等级不低于IP54, 适应矿井恶劣作业环境。

二、基于物联网的矿井安全系统功能模块设计

(一) 硬件设计

硬件系统以STM32单片机为核心, 构建“主控—传感器—通信—报警”的全链路硬件架构, 各模块选型与设计如下, 硬件模块连接关系及功能简介如表1所示。

能力, 因此在使用时一方面结合矿井主要有害气体组分, 确认MQ-2传感器对目标气体的检测灵敏度是否满足设计要求, 必要时通过对比试验完成传感器选型验证。另一方面优化系统级配置, 通过与矿井通风参数、作业工况等数据进行多源融合分析, 构建气体浓度的多维度判断模型。当传感器检测到浓度异常时, 结合该区域通风量、作业类型等信息进行二次校验, 弥补传感器无法区分气体组分的缺陷^[3]。

3. 单片机模块

本系统使用工作频率72MHz, 具备丰富外设资源(3个USART接口+12位ADC+多个GPIO接口)的STM32F103RCT6单片机作为主控核心, 核心功能如下: 通过GPIO与ADC接口采集DHT11与MQ-2传感器数据, 完成数据解析与校验; 通过USART接口与ESP8266 Wi-Fi模块通信, 将处理后的监测数据传输至网络层; 实时判断监测数据是否超出预设阈值, 若超标则通过GPIO口驱动蜂鸣器报警, 并生成报警信息同步传输至应用层; 通过DC-DC电源模块将矿井12V直流电源转换为3.3V稳定电压, 保障供电可靠, 各种传感器、通信模块、显示屏等外设正常运行。

(二) 软件设计

软件采用C语言基于Keil MDK开发环境编写, 运行流程可概括为系统初始化→数据采集→数据处理→数据传输、报警控制, 包含数据监测、报警预警、用户管理、历史溯源等模块。

数据监测模块采用可视化图表实时展示温湿度、可

燃气体浓度数据，支持数据刷新频率调节；报警预警模块接收报警信息后弹出报警弹窗并播放报警提示音，同时记录报警时间、参数、位置，支持报警信息导出；用户管理模块由管理员操作，允许用户创建账号、重置密码。管理员具备全功能权限，安全员仅具备数据查看与报警处理权限；历史数据模块支持日、周、月、年等多类别时间查询，并提供Excel数据统计报表生成导出。

采集阶段按设定频率采集DHT11温湿度数据与MQ-2气体浓度数据，并校验采集数据剔除异常数据；处理阶段

将有效数据转换为标准化格式；传输阶段通过Wi-Fi模块将监测数据与设备状态信息发送至应用层，若网络中断则将数据暂存于单片机Flash存储器，网络恢复后自动补传；控制阶段实时对比监测数据与预设阈值，若数据超标则立即驱动蜂鸣器报警，并自动生成报警信息。

(三) 数据库设计

数据库采用MySQL关系型数据库，设计用户表(t_user)，采集履历表(t_monitor_data)，温度表(t_alarm_record)用于存储用户信息、监测数据与报警记录(如图2)。

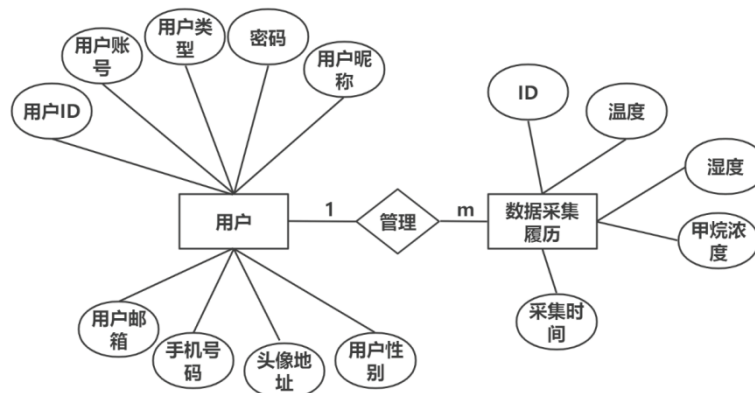


图2 系统总E-R图

三、基于物联网的矿井安全系统测试

采用黑盒测试与性能测试相结合的方法，模拟矿井实际作业环境，参数设置如下：温度0~40℃+湿度30%~90%RH+微弱电磁干扰，检测系统各模块能否正常、稳定运行^[4]。

通过改变测试环境温湿度，验证传感器采集数据准确性与报警触发及时性；采用浓度0.5%~2.0%LEL的标准甲烷气体样本，验证浓度数据测量精度与报警阈值准确性；连续运行系统72小时，验证系统稳定性。关键测试结果如表2所示。

表2 关键参数

测试类别	实际结果
传感器数据采集准确性	温度误差 ± 0.3℃，湿度误差 ± 2%RH，甲烷误差 ± 0.08%LEL
报警触发及时性	报警触发时间0.8s，推送延迟1.5s
用户权限管理有效性	用户无越权操作
数据传输实时性	传输成功率99.7%，平均延迟2.8s
系统响应能力	CPU占用率65%，页面加载时间2.5s
长期运行可靠性	72小时内无故障
故障恢复能力	故障检测时间3s，恢复时间45s
高温高湿耐受性	传感器误差增加 ≤ 0.2℃
防尘防水能力	密封性良好

结论

综上所述，本文遵循软件与硬件协同优化原则，设计包含井温湿度、可燃气体浓度实时监测、智能预警、可视化管理等功能的矿井安全系统。测试结果显示系统各功能模块运行正常，满足矿井长期安全监测需求，验证其在复杂井下环境下具有较好的实用性。未来可引入AI算法优化预警精度，并探索5G与边缘计算的深度融合，进一步提升系统实用性。

参考文献

- [1] 贺胤杰, 李晨鑫, 魏春贤. 基于边界隔离与系统防护的矿井网络安全系统研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(03): 14-21.
- [2] 谢尊贤, 郝聪, 张志远, 等. 基于FTA-BN的矿井安全监控系统运行可靠性分析[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(02): 64-68.
- [3] 邢鹏荣. 基于物联网的矿井安全监控系统的设计及应用效果分析[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(11): 181-183+190.
- [4] 刘辉, 傅廷波, 曹利明. 矿井安全监控系统内接触点式馈电传感器的研究与应用[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(01): 145-146+148+151.