

融合 UWB 定位与物联网云平台的智慧矿井监测系统设计

甘丽霞 田海洋

攀枝花学院

DOI:10.32629/acair.v4i2.20406

[摘要] 煤矿井下安全监管长期面临人员定位精度不足、环境参数采集滞后、应急联动效率偏低等突出问题。本文设计并实现一套基于UWB超宽带高精度定位与物联网云平台的一体化智慧矿井监测系统。系统以博创物联网口袋机V1.0开发板为核心控制单元,集成UWB定位模块、甲烷/氧气传感器、温湿度传感器及ESP8266Wi-Fi通信模块,采用双边双向测距结合空间三边交会法解算人员三维坐标,依托最小二乘线性回归模型实现瓦斯浓度短期变化趋势预测,通过MQTT轻量级通信协议完成数据上传至ThingsCloud云平台与控制指令下发。经现场实测试验:UWB定位误差稳定小于30cm,瓦斯浓度预测趋势与实测值拟合度较高,异常报警至执行设备启动响应时间不超过25s。系统将定位追踪、环境监测、趋势预测与自动控制融为一体,形成“感知—传输—决策—执行”闭环控制架构,可为智慧矿山安全管控体系建设提供可落地、可复制、可扩展的技术方案与实践参考。

[关键词] 智慧矿井; UWB定位; MQTT协议; ThingsCloud

中图分类号: TD163 **文献标识码:** A

Design of a Smart Mine Monitoring System Integrating UWB Positioning and IoT Cloud Platform

Lixia Gan Haiyang Tian

Panzhihua University

[Abstract] Coal mine underground safety supervision has long faced prominent issues such as insufficient personnel positioning accuracy, lagging environmental data acquisition, and low emergency response efficiency. This paper designs and implements an integrated smart mine monitoring system based on UWB ultra-wideband high-precision positioning and IoT cloud platform. The system takes the BOCCH IoT Pocket Computer V1.0 development board as the core control unit, integrating UWB positioning module, methane/oxygen sensors, temperature and humidity sensors, and ESP8266 Wi-Fi communication module. It adopts double-sided two-way ranging combined with spatial trilateration to calculate the three-dimensional coordinates of personnel, relies on the least squares linear regression model to predict short-term trends of gas concentration, and uses the MQTT lightweight communication protocol to upload data to the ThingsCloud cloud platform and issue control instructions. Field test verification shows that the UWB positioning error is stably less than 30 cm, the predicted gas concentration trend has a high degree of fit with the measured values, and the response time from abnormal alarm to actuator device startup does not exceed 25 seconds. The system integrates positioning tracking, environmental monitoring, trend prediction, and automatic control into a unified whole, forming a closed-loop control architecture of "perception-transmission-decision-execution", which can provide a deployable, replicable, and scalable technical solution and practical reference for the construction of smart mine safety management systems.

[Key words] Smart mine; UWB positioning; MQTT protocol; ThingsCloud

1 引言

煤矿与金属矿山井下作业环境普遍存在高瓦斯、高粉尘、空间受限、通信遮挡严重等特征,安全事故防控压力持续较大。

^[1]传统矿井安全管理模式以人工巡检、定点传感器监测为主,

存在三大核心短板:一是人员定位信息粗放,调度端仅能判定人员所在区段,无法获取精准实时坐标,事故发生后救援定位难度大;二是环境数据采集呈离散点状分布,传感器报警、人工上报、设备启动的流程链条冗长,应急响应滞后;三是定位系统、环境

监测系统、设备控制系统相互独立,数据无法互通共享,难以实现协同联动与智能决策。^[2]

国家《“十四五”国家应急体系规划》明确提出,推动矿山安全管理向信息化、智能化、无人化方向转型升级。近年来,UWB超宽带定位技术凭借脉冲宽度窄、抗多径干扰强、穿透性能优、测距精度可达厘米级等优势,逐步成为井下人员定位的主流技术方向;^[3]MQTT协议以轻量级、低功耗、支持断线重连、消息可靠传输等特点,成为物联网设备通信的主流标准。当前多数工程应用将UWB定位与环境监测拆分为两个独立系统部署,缺乏从顶层设计实现定位、感知、预测、控制的深度融合,难以满足智慧矿井一体化安全管控需求。^[4]

为此,本文结合井下实际作业场景与安全管控需求,设计一套硬件易部署、软件可扩展、数据可联动的智慧矿井监测系统,下文详细阐述系统硬件选型、整体架构、通信机制、算法设计及实验验证过程,为同类系统研发提供技术支撑。

2 系统方案设计

2.1 总体设计思路

系统设计遵循三大核心原则:以人员精准位置为联动核心、以环境实时数据为决策依据、以自动控制为安全兜底保障,按照“感知—传输—决策—控制”的闭环逻辑,将系统划分为四层架构:感知层负责采集两类数据:人员坐标(来自UWB标签)和环境参数(甲烷、氧气、一氧化碳、温湿度)。同时,也接收并执行风机启停、报警器开关等控制指令;传输层采用ESP8266模块,该模块通过串口与主控板交换数据,再经Wi-Fi网络,以MQTT协议连接到云平台;平台层选用ThingsCloud物联网云,它内置规则引擎、时序数据库和可视化仪表盘,可以免去自建服务器的运维负担;应用层提供Web端和移动APP,安全员和值班长根据角色权限进行监控和操作。

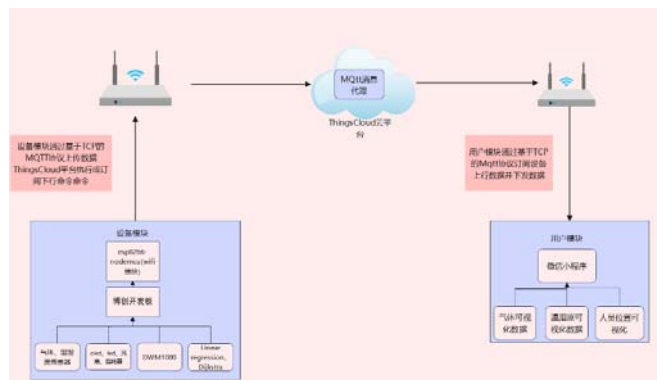


图1 系统架构图

系统数据流设计依次为:传感器采集数据→主控板预处理→ESP8266打包上传→云平台存储并进行阈值判断与趋势预测→当条件触发时下发控制指令→ESP8266接收指令并转发→主控板驱动风扇或蜂鸣器执行动作。定位数据独立上传至上位机C程序,用于生成三维轨迹,同时同步至云平台参与联动判断。整体设计保证各模块之间通过标准化接口(串口、MQTT主题、RESTAPI)

连接,后期增加新传感器或定位基站非常方便。系统总体架构如图1所示。

2.2 硬件选型与模块设计

硬件选择方面,遵循“低成本、低功耗、高可靠、易采购”四项原则,所有器件均选用市场上成熟且经过矿用环境验证的型号。

主控单元选用博创开发板(物联网口袋机V1.0)。该开发板基于ARMCortex-M3内核,主频72MHz,片上集成多路ADC、USART、GPIO和定时器。开发板提供的扩展接口可以同时连接气体传感器(模拟输出)、温湿度传感器(单总线)、UWB模块(串口)和ESP8266(串口),不需要额外扩展板,这简化了硬件设计。

UWB定位模块采用DWM1000芯片方案。该芯片集成射频收发、天线和测距固件。基站和标签使用相同硬件,仅通过烧录不同固件来区分角色。基站采用TDOA改进算法,标签采用双边双向测距,最终由上位机完成三维坐标解算。在设计时,我们将基站部署间隔设为50至80米,确保井下巷道能够全覆盖。

气体传感器方面,甲烷检测选用MQ4传感器,敏感材料对甲烷响应速度快、恢复时间短,模拟电压输出0~5V,对应浓度量程0~10000ppm;氧气检测选用A0-03电化学传感器,输出线性电压信号;一氧化碳检测选用MQ7传感器,输出模拟电压信号。^[5]三类传感器分别占用主控板3路ADC通道,数据采样周期设置为2s,保证数据实时性。

执行器和显示模块方面,直流风扇(12V)用于强制通风,通过继电器模块由主控板GPIO控制启停;有源蜂鸣器(5V)用于声光报警,直接由GPIO驱动;显示部分采用0.96英寸OLED屏幕,实时显示当前甲烷浓度、氧气浓度、温度和湿度,方便井下人员现场查看。

所有模块均使用杜邦线进行插拔式连接。同时,在主控板上预留了额外的GPIO和串口,便于日后增加粉尘传感器、震动传感器或第二个UWB标签。

2.3 关键算法与通信协议设计

定位算法采用双边双向测距法,消除标签与基站间时钟漂移带来的测距误差。核心流程:标签发起测距请求→基站反馈响应并记录时间戳→经三次信号交互计算精确信号飞行时间→乘以光速得到测距结果。标签与至少3个已知坐标基站完成测距后,上位机采用空间三边交会法解算标签三维坐标,该算法无需基站间高精度时钟同步,适配井下复杂部署环境。系统设置单次测距5次并取中位数,有效抑制多径干扰与随机噪声,提升定位稳定性。

瓦斯浓度趋势预测采用线性回归算法嵌入短期趋势分析,系统自动缓存最近10组甲烷浓度历史数据,基于短时间内浓度近似线性变化的特性,通过最小二乘法拟合变化直线,外推2个采样周期的浓度预测值。若预测值超过安全阈值(甲烷浓度 $\geq 1.0\%$),系统提前发出预警并自动启动风机,将安全响应模式由“事后报警”升级为“事前预警”,为人员撤离与设备联动预留时间。

通信协议选用MQTT轻量级协议,适配低带宽、不稳定的井下Wi-Fi环境。ESP8266作为MQTT客户端,配置两类主题:发布主题用于上传JSON格式数据,包含甲烷、氧气、一氧化碳浓度、温湿度、时间戳、设备ID等信息;订阅主题用于接收云端控制指令。MQTT连接采用QoS=1等级,确保消息至少送达一次,开启保留消息功能,新上线设备可立即获取最新控制状态;心跳间隔设置为60s,网络断开时ESP8266自动重连,恢复连接后续传未确认消息,避免数据丢失。

3 实验验证

3.1 甲烷浓度监测与预测实验

甲烷浓度监测与预测实验在模拟巷道中进行。系统每30秒采集一次甲烷浓度,利用最近10个历史数据通过线性回归模型预测下一时刻值。安全阈值设为1.0%。当实测浓度从0.8%缓升至0.9%时,模型预测值将突破1.0%,系统提前约30秒发出预警并自动启动风机。风机运行90秒后浓度开始下降。缓变场景下预测趋势与实际一致,但浓度跳变时模型偏差较大,系统通过连续三次异常才报警的机制避免了误动作。线性回归方法可有效实现事前预警,但对剧烈波动需增加滤波改进。

3.2 UWB定位与轨迹追踪实验

UWB定位实验选取了井下五个典型区域(采掘区、通风巷、瓦斯重点区、临时作业区、采空区边缘)。测试人员佩戴UWB标签沿规划路径行走,上位机软件实时解算三维坐标并映射至矿井模型。实验结果显示,所有场景的定位误差均小于30厘米,危险区域(瓦斯重点区、采空区边缘)被系统自动识别并触发报警,运动轨迹连续无跳点。当瓦斯监测区浓度异常升高时,定位子系统自动查询区域内人员标签并推送撤离指令,实现了跨模块联动。该定位精度满足井下精细化调度与应急救援需求,轨迹连续性与危险区识别能力验证了算法的有效性。

3.3 云平台指令响应与数据可靠性测试

云平台功能测试通过ThingsCloudWeb端向井下设备发送8组控制指令,涵盖正常指令(开启风机、关闭蜂鸣器)与一条无效

指令。所有有效指令均被正确执行,无效指令被平台规则引擎拦截并返回错误提示。数据上传测试以10秒周期连续运行12小时,4320条数据无一丢失。断线重连测试中,人为断开Wi-Fi 30秒后恢复,ESP8266自动缓存并续传,数据完整率达100%。系统从传感器报警到风机启动的平均响应时间约为25秒,较传统人工方式(约120秒)提升近4倍,验证了MQTT通信链路的可靠性。

4 结论

本文面向矿井安全管控实际需求,完成融合UWB高精度定位与物联网云平台的智慧矿井监测系统设计与实现。设计层面以人员位置为联动纽带、环境数据为决策依据,构建“感知—传输—决策—控制”一体化闭环体系;硬件层面选用博创开发板、ESP8266及矿用传感器,兼顾成本、可靠性与部署便捷性;算法与通信层面,采用双边双向测距实现厘米级定位,线性回归模型实现瓦斯浓度短期预测,MQTT协议QoS机制保障指令可靠传输。实验数据表明,系统定位精度、预测性能、响应速度均达到设计指标,可有效解决传统矿井定位模糊、监测滞后、联动不足等问题,为智慧矿山安全智能化建设提供可行技术路径。

[参考文献]

- [1]张超林,王恩元,王奕博,等.近20年我国煤与瓦斯突出事故时空分布及防控建议[J].煤田地质与勘探,2022,50(4):1-9.
- [2]杨传久,谭业勇,徐鹏飞.煤矿井下UWB精确定位的研究与应用[J].智能矿山,2023,4(12):28-33.
- [3]韦子辉,李小阳.基于自适应Levy飞行改进的TDOA三维定位算法[J].河北大学学报(自然科学版),2023,43(2):201-209.
- [4]孙继平,程继杰.煤矿冲击地压和煤与瓦斯突出感知报警方法研究[J].工矿自动化,2022,48(1):1-7.
- [5]李亚宁.基于物联网技术的矿井有害气体自动监测系统[J].自动化技术与应用,2023,42(3):78-82.

作者简介:

甘丽霞(1982--),女,汉族,四川攀枝花人,工程硕士,讲师,研究方向:计算机应用。