

文章编号: 2096-1618(2025)01-0036-06

基于 OpenHarmony 的矿下安全作业智能管控系统设计

程仲汉, 林子铭, 林子奎, 李紫静, 赖怡欣, 詹鸿辉

(福建警察学院计算机与信息安全管理系, 福建 福州 350007)

摘要: 大多数伤亡较大的煤矿安全事故发生前期往往伴随着环境的潜在变化, 因为不能及时察觉而错过了最佳救亡时机。由此提出基于“人-机-环-管”的矿下安全作业智能管控系统, 旨在通过智能管控设备实现实时监测、准确预警。系统通过物联网技术实现矿下环境监测、生命体征监测、实时定位和联网控制等几大功能, 还包括智能报警、智能语音助手、电子栅栏、可视化云平台等其他辅助功能, 以完善系统的安全管控作用。经实验结果表明, 系统能稳定运行并实时监测矿下作业环境, 提供精准的定位信息, 可有效提高煤矿下安全作业系数, 为数字矿山建设奠定了安全基础。

关键词: 矿下安全作业智能管控系统; 物联网; 矿下环境监测; 可视化云平台

中图分类号: TP316.81

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcui.2025.01.006

0 引言

能源转型发展对矿山安全提出更大挑战。未来相当长时期内, 煤炭仍是中国主体能源。同时, 煤矿生产大部分是地下作业, 地质及开采条件复杂多变, 不安全因素多, 经常受到瓦斯、煤尘、火水及顶板等灾害的威胁。据调查显示, 近 30% 的安全事故由瓦斯引起, 35% 为顶板事故, 20% 为爆炸和水灾事故, 剩余 15% 为其他事故^[1]。再进一步分析煤尘、瓦斯、CO 及环境温湿度变化情况时发现, 煤尘不仅是导致“尘肺”的首要因素, 也是引起矿井爆炸的主要物质之一, 瓦斯和 CO 往往也是导致矿井爆炸和火灾事故的一大因素, 地热与机电等设备放出的热量将会引发热害, 从而影响人的工作效率, 使人精神恍惚, 严重时还可能危及生命^[2]。当前, 矿井安全监控仍存在着漏洞, 并且煤矿工人无法及时感知这几类危险因素导致的微小环境变化, 矿难时有发生。因此, 为确保井下作业人员的安全和保证矿井正常生产, 矿下安全作业智能管控系统的研究十分重要。

目前, 国内外相关领域的学者提出针对矿山安全作业的管控系统, 主要探讨了煤矿智能化安全保障体系的内涵与关键技术。孔丽丽等^[3]提出一种矿用智能安全头盔智能终端系统, 以 STM32F103 微处理器作为系统控制核心, 采用 RFID 高性能室内定位技术实现矿井复杂环境下的人员定位; 配备有毒气体检测、温湿度等环境信息采集传感器。但 RFID 技术无法实时

跟踪, 在提高精度方面所需的部署相对复杂, 数量较多。贾颖等^[4]设计了一种基于 WiFi 网络的煤矿井下安全监控系统, 该系统具有井下瓦斯浓度、氧气含量、CO₂ 含量的监测功能。但安全性较低, 产品的无线稳定性也比较差, 且缺少生命体征检测的功能。林逢春等^[5]设计了基于 ZigBee 的煤矿监测系统终端, 以 STM32F407 单片机为主控器, 由 ZigBee 模块在线转发设备运行与矿井环境数据。虽然 ZigBee 技术具有功耗低、成本低的优点, 但存在数据传输速率低, 有效范围小, 抗干扰能力差, 且该系统缺少生命体征检测的功能。张立亚^[6]提出一种基于图像识别的煤矿井下安全管控技术, 能动态识别人、机、环、管各方面的危险, 但无法感知环境中气体成分与矿下工作者的生命体征的细微变化。Chen 等^[7]探索将最新的 WSN 技术应用于矿下安全监测, 提出基于无线传感器网络的煤矿安全智能监测。但传输能力比较有限, 且节点数量众多难于维护。Shabina 等^[8]提出基于射频和无线传感器网络技术的井下安全智能头盔, 选择射频技术进行矿井内部通信, 无线传感器网络用于感知不利的工作环境。上述智能管控系统都存在着不同的缺陷。

为此, 本文提出基于 OpenHarmony^[9]的矿下安全作业智能管控系统。旨在通过实时采集并分析矿下工作者的工作环境参数、生命体征及地理定位信息, 使得矿上、矿下人员能够在第一时间发现异常, 采取及时有效的应对措施。其中, 生命体征监测的功能可用于预防矿山安全事故瞒报等问题。如若发生危险事故, 矿上工作人员可根据云端监控中心显示的数据展开及时有效的救援。此外, 综合考量了矿工们的工作流程复

杂等问题及本身文化程度上的不足,系统在设计过程中始终秉承着化繁为简、易操作的原则,解决大多数矿工们所担心的智能产品不会用的问题。

1 总体架构设计

系统设计采用兼具高性能和灵活性的海思 Hi3861V100 开发板,配合 OpenHarmony 操作系统,结合物联网技术及 ThingsCloud 云服务平台等,实现国产化架构设计。

系统将任务分为 4 个子任务,通过调度不同子任务来协调完成系统功能,以提升程序运行的效率与程序的健壮性。如图 1 所示,系统总体架构主要划分为:环境信息监测子任务、生命体征监测子任务、定位救援子任务、云端交互子任务。其中,最为核心的部分为前 3 个子任务。

以上 4 个子任务独立进行,这样既可保证程序的稳健性,还能保证系统数据的实时有效性。

(1)环境信息监测子任务。该任务主要负责采集矿下环境的瓦斯、烟雾、CO 等毒性气体浓度及环境温度湿度。

(2)生命体征监测子任务。采集的信息是人的一些重要生命体征信息,如心率、血氧、体温。

(3)定位救援子任务。本系统还能够实时采集矿下工作人员的定位信息。定位信息在日常指挥调度中是必不可少的,在事后救援工作中也时常发挥着重大作用。

(4)云端交互子任务。以上数据信息采集得到后,会先在本地进行数据处理和分析,根据分析的结果,决定是否触发报警设备,并能够随时提供给矿下工作人员参考。由于已分析的结果仅仅停留在本地是不能发挥其最大作用的,因此,本系统还具有联网控制功能。通过 Hi3861V100 主控自带 WiFi 通信模块,可连接云服务平台,将分析的结果实时上传云端并实现数据可视化供矿上监控人员使用。

系统将图 1 所示的数据采集传感模块搭载在矿下工作人员佩戴的安全帽上。如图 2 所示,安全帽通过 UWB 协议与 UWB 基站进行无载波通信,并采用 TOF 双边双向测距法来实现精确定位。同时,使用 WIFI (MQTT)协议将信息传输到路由器,并通过路由器将信息转发到指定的云端服务器完成数据的解析与可视化。

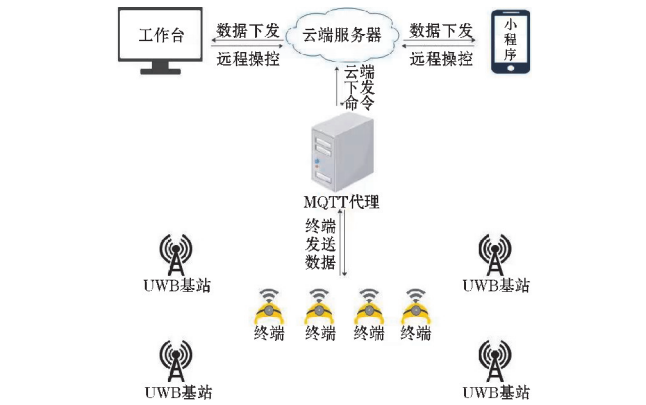


图 2 硬件拓扑结构图

2 技术架构设计

系统技术架构如图 3 所示,由硬件层、资源层、传输层和平台层 4 个抽象层组成。

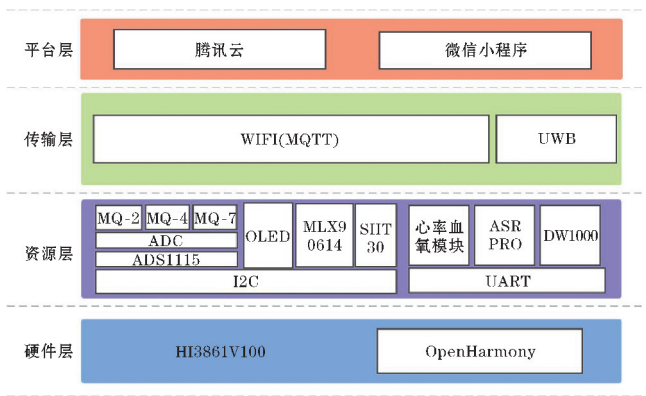


图 3 系统技术架构图

2.1 硬件层

OpenHarmony 是一个致力于万物互联的、可自定义裁剪的操作系统,分为轻量系统、小型系统和标准系统。轻量系统主要应用于传感器设备、穿戴设备等,小型系统通常用于 IPCamera、行车记录仪、路由器等设备领域,标准系统则应用于更为大型的电子产品中。本系统选用的是轻量系统。

2.2 资源层

资源层与操作系统之间主要通过 I2C 和 UART 协

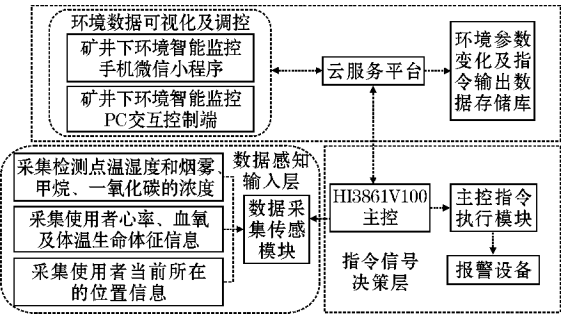


图 1 总体架构设计

议进行通信。气体采集模块 MQ-2、MQ-4、MQ-7 需通过 A/D 模块将模拟信号转为数字信号再通过 I2C 总线进行数据传输。其他各模块可直接连接在开发板上进行通信。

2.2.1 毒性气体监测

系统设计接入的 MQ-2 烟雾传感器、MQ-4 甲烷传感器、MQ-7 一氧化碳传感器分别用于对煤矿井下空气中的煤尘、瓦斯、CO 等有害气体的浓度进行数据采集。

在智能安全帽设备初始化成功后,系统会分别由 3 个不同的线程自动读取各传感器经过 AD 转换后的实时烟雾值、瓦斯值和 CO 值,并不断对各 AD 值进行数据处理和分析,转化成以 ppm 为单位的数据。随后系统会根据矿山行业对矿下作业环境中不同有害气体的浓度阈值标准所设置相应的危险阈值,自行决断是否发出警报以打断正在专心工作的矿工们,提示他们应快速撤离,同时云端也会接收到该危险信号,矿上监控人员可立即采取有效措施。

2.2.2 生命体征监测

系统选用 MAX30102^[10] 和 MLX90614^[11] 实现对智能安全帽设备使用者的心率、血氧饱和度和体温进行实时采集,并通过传感器内部的微处理器进行信号处理。

Maxim 公司的 MAX30102 是高灵敏度血氧和心率生物传感器,包括内部的 LED,光电检测器,光学元件,以及环境光抑制的低噪音电子学。通信通过标准的 I2C 接口进行,工作温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$,能够良好地适应矿井下高温环境。且其体积足够小,响应速度足够快,支持连续测量心率、血氧,符合系统设计需求。

MLX90614 是一种红外温度计,根据人体的红外辐射能量来确定物体的温度,用于非接触式温度测量,同样具有体积小、精度高、成本低等特点。

2.2.3 环境温湿度监测

系统选用 SHT30 温湿度传感器来完成系统温湿度数据采集的任务。SHT30 是一款低成本版的温湿度传感器,其芯片采用高集成度电容式测湿元件和能隙式测温元件,使其能够提供极高的可靠性和出色的长期稳定性,具有功耗低、反应快、康干扰能力强等优点。传感器内部经过校准、线性化与放大,最终输出与温湿度呈线性关系的模拟电压。

2.2.4 UWB 定位

(1) 定位基站

各种定位技术都有其相对参照物,如基于测距的

RFID 定位技术^[12]主要思想是 RFID 设备读取待测目标的信号特征,并将其转换为实际距离,从而获得待测目标的坐标,实现定位。而本系统的定位技术的相对参照物即为 UWB^[13] 定位基站,如图 4 中的设备 B。

(2) 定位标签

系统设计的每个安全帽设备上会配备有 UWB 定位标签。通过该定位标签与定位基站进行通信,如图 4 的设备 A。

(3) 测距算法

针对井下空间特点,系统设备采用基于 TOF 的双边双向测距法^[14]以尽可能实现精确定位的目的。测距算法原理如图 4 所示。

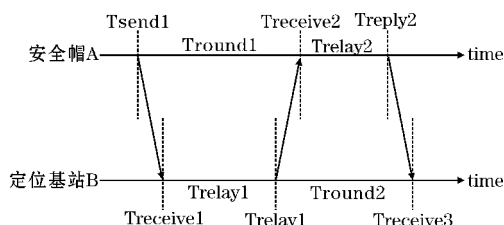


图4 双边双向测距算法

设备 A 会主动向设备 B 发送数据,同时记录时间戳(Tsend1),设备 B 接收到数据时也会记录一个时间戳(Treceive1),而后设备 B 会延迟一小段时间(Trelay1)再向 A 回应一个数据并记录回应时间戳(Treply1),设备 A 接收到该回应之后记录时间(Treceive2)。而后设备 A 会延迟一段时间(Trelay2)再向设备 B 发送数据并记录时间戳 Treply2,设备 B 接受到数据再记录一个 Treceive3。

总的来说,该算法需要 3 段消息传输时间差去求解消息在空中飞行的时间,最后将得到的飞行时间乘上光速即可得到设备 A 与设备 B 的距离。

在矿下通常会布置多个基站设备,通过设备 A 与不同基站的距离,可以实现较为精确的定位。

(4) 电子栅栏监控

考虑到带帽者可能会出现未在 UWB 定位基站可测的范围,从而导致信号断开,数据丢失异常等其他异常情况。本系统在软件层面开发了基于 UWB 的电子栅栏功能。

其设计思想是当设备未在工作范围,系统会记录脱离工作范围的时间信息,并发出警报。其实现原理如图 5 所示。假设 4 个基站分别为 A、B、C、D,距离分别为 E、X、Y、Z。安全帽设备在收集好这些信息后与当前时间以及安全帽设备的 MAC 地址一起打包成

UDP 数据包,并进行广播。系统指定基站 A 在收到 UDP 广播包以后将数据中的 E 、 X 、 Y 、 Z 信息进行剥离。并作为自身算法参数做相应的计算,计算结果设为 K 。A 基站运算出 K 后,将 K 与当前时间信息、安全帽设备 MAC 地址打包成 UDP 数据包后进行广播。在各安全帽设备接收到该广播包后,首先判断其中的 MAC 地址是否指向自己。若是则解析其中的 K 值与时间信息,若不是则直接丢弃。如果 K 值为 True 则响起警报,同时将这些信息同步至云端供工作人员参考。

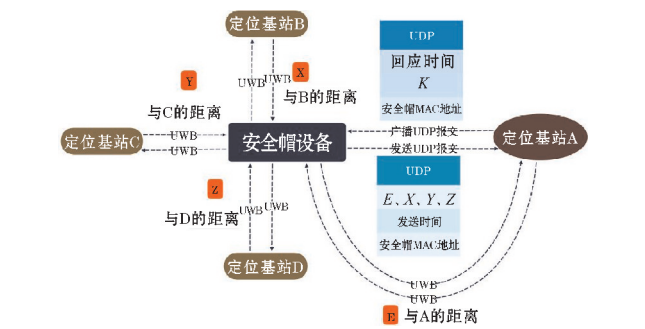


图 5 电子栅栏工作原理

2.3 传输层

采用 MQTT(消息队列遥测传输)协议进行基于 WiFi 的通信,可以实现系统实时数据传输,解决服务质量问题。

MQTT 为一种低开销,低带宽占用的通信协议,使用 TCP/IP 提供网络连接,提供有序、无损、双向连接。可以在硬件性能和带宽不高的设备上稳定地运行,提供实时可靠的消息服务。

2.4 平台层

系统的云平台采用 ThingsCloud 进行搭建,并通过 ThingsCloud 将数据转发至微信小程序与 SAAS 服务中。

如图 6 所示,在云端监控平台上可直观显示矿下环境的各项数据及有关矿下工作人员的信息。出于便携的考虑,在非监控中心的其他人员可通过系统的微信小程序端远程观察作业情况。



图 6 云端监控平台

如图 7 所示,出于便携的考虑,在非监控中心的其他人员可通过本系统的微信小程序端远程观察作业情况。系统的微信小程序通过云端服务器自动生成,采取零代码的形式编写。由于上传的数据会被解析成各个组件信息,所以只需要设置需要显示的组件,即可在小程序中查看对应组件的数据信息。



图 7 小程序端平台

3 仿真实验

3.1 实验环境

由于真实的矿井数据采集较为困难,矿井人员数据有较高的保密性,故将系统设备置于某商业楼宇的地下二层停车场环境中进行仿真实验。

实验所用传感器包括 MQ-2 烟雾传感器、MQ-4 甲烷传感器、MQ-7 一氧化碳传感器和 MAX30102 高灵敏度血氧和心率生物传感器、MLX90614 红外温度传感器、SHT30 温湿度传感器。

实验每次采集数据的时间长度为 30 分钟,由传感器 MAX30102、MLX90614 测量生命体征,气体采集模块 MQ-2、MQ-4、MQ-7 检测目标气体含量。SHT30 检测环境温湿度。经过严格的测试,在云端监控平台上生成实时曲线效果图。

3.2 功能验证

经过大量的数据测试,综合结果分析如下。图 8 为系统所测得生命体征信息实时曲线图,图 9 为系统测得的环境温湿度曲线图,以上结果符合实际情况,达到预期效果。

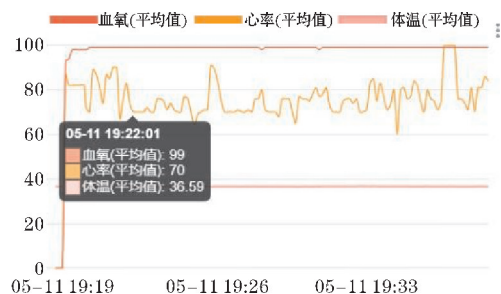


图8 生命体征信息

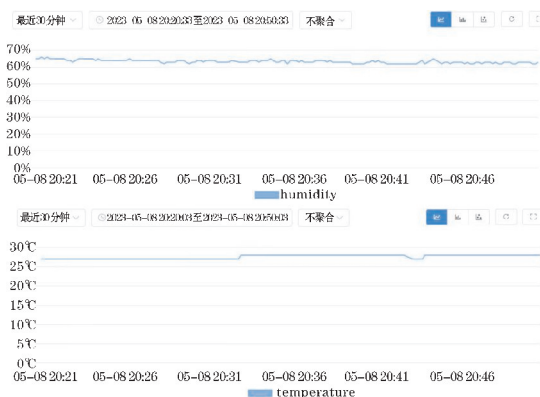


图9 环境湿度、温度数据

图10为系统设备的体温测量值与体温枪测得的一例数据,经过比较得出本系统设备的测量误差范围控制在 0.5°C 以内。



图10 体温测量值对比图

图11为气体采集模块在实验环境中分别测得的烟雾、甲烷和一氧化碳含量的变化曲线图。图12为实验环境中上述气体的含量。据分析比较发现,环境中烟雾浓度稳定在 $1\sim 3\text{ ppmv}$,系统设备所测的烟雾含量在 $1.2\sim 1.3\text{ ppmv}$,误差极小;环境中甲烷浓度稳定在 $8\sim 12\text{ ppmv}$,系统设备所测的甲烷含量在 $2\sim 3\text{ ppmv}$,误差不大;环境中一氧化碳浓度稳定在 $6\sim 13\text{ ppmv}$,系统设备所测的一氧化碳含量在 $2.4\sim 2.6\text{ ppmv}$,误差较小。以上测试数据表明系统设计满足实际需求,能实现对矿井安全精确管控,符合预期效果。



图11 烟雾、甲烷、一氧化碳浓度监测数据

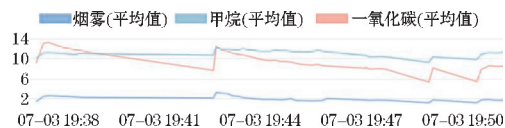


图12 环境信息

4 结束语

系统由矿下智能数据采集和矿上云平台监控两个实体子系统组成。矿下智能数据采集系统通过接入的各类传感器硬件模块采集矿下工作环境、工作者生命体征及地理定位等数据信息,并通过开发板自带的WiFi模块连接能与互联网互通的矿下局域网将数据实时上传到矿上云平台监控系统。矿上云平台监控系统的工作者即可通过可视化云平台展示的各类数据及求救信号等其他信息,及时了解矿下工作环境,对矿下安全实时管控。由此形成“人-机-环-管”的矿下安全作业智能管控系统。本系统还存在一些不足,未来将继续完善煤矿井下环境数据监控系统,以及提升矿下安全作业智能管控系统的安全性。

参考文献:

- [1] 赵亚军,张志男,贾廷贵.2010-2021年我国煤矿安全事故分析及安全对策研究[J].煤炭技术,2023,42(8):128-131.
- [2] 张德飞,曹有勋,赵娜,等.一种新型煤矿井下高温作业特种防护服的设计研究[J].煤炭工程,2012,7(7):121-122.
- [3] 孔丽丽,易春求.矿用智能安全头盔的设计[J].

- 中国矿业,2020,29(12):95.
- [4] 贾颖,邵广贤,邓思敏,等.基于 WiFi 技术的井下环境监测系统设计[J].煤炭技术,2015,34(4):314-316.
- [5] 林逢春,陶燕.基于 ZigBee 的煤矿监测系统终端设技术[J].煤炭技术,2023,42(4):234-236.
- [6] 张立亚.基于图像识别的煤矿井下安全管控技术[J].煤矿安全,2021,52(2):165-168.
- [7] Chen W,Wang X. Coal Mine Safety Intelligent Monitoring Based on Wireless Sensor Network [J]. IEEE Sensors Journal,2021,(11)22:25465-25471.
- [8] Shabina S. Smart Helmet Using RF and WSN Technology for Underground Mines Safety [C]. 2014 International Conference on Intelligent Computing Applications,Coimbatore,India,2014:305-309.
- [9] 李兰花,郭艳婷,钟宇琢.基于华为鸿蒙的开源社区多样化协作模式研究[EB/OL]. 科学研究,2023-09-01.
- [10] 白鹏飞,刘强,段飞波,等.基于 MAX30102 的穿戴式血氧饱和度检测系统[J].激光与红外,2017,47(10):1276-1280.
- [11] 钟君,蔡黎明,于涌.基于 MLX90614 的无线温度采集系统设计[J].传感器与微系统,2015,34(3):87-93.
- [12] 李川,王荣海,赵红军.基于标签虚拟化的 RFID 室内 RSSI 无线定位算法[J].电子器件,2020,43(6):1403-1410.
- [13] 张海军,孙学成,赵小虎,等.煤矿井下 UWB 人员定位系统研究[J].工矿自动化,2022,48(2):29-41.
- [14] 李小亭,郎月新,韦子辉,等.基于改进双向双边测距的超宽带定位技术及应用研究[J].中国测试,2019,45(10):21-27.

Design of Intelligent Management and Control System for Underground Safety Operations based on OpenHarmony

CHENG Zhonghan, LIN Ziming, LIN Zikui, LI Zijing, LAI Yixin, ZHAN Honghui
(Department of Computer and Information Security Management, Fujian Police College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The early stage of most coal mine safety accidents with large casualties is often accompanied by potential changes in the environment. The miners miss the best time to save their lives because they cannot detect it in time. Therefore, we propose an intelligent control system for mine safety operation based on a “man-machine-environment-pipe”, aiming to realize real-time monitoring and accurate early warning through intelligent control equipment. The system through the Internet of Things technology, includes mine environment monitoring, vital signs monitoring, real-time positioning and network control, and other major functions, including intelligent alarm, intelligent voice assistant, electronic fence, visual cloud platform, and other auxiliary functions, to improve the security control function of the system. The experimental results show that the system can run stably and monitor the underground working environment in real-time, provide accurate positioning information, and effectively improve the safety operating coefficient of the underground coal mines, laying a safe foundation for the construction of the digital mine.

Keywords: intelligent control system for mine safety operation; internet of things; mine environment monitoring; visual cloud platform