

基于 UWB 技术的矿井人员安全保障系统研究

白晓轩，冯锋

(宁夏大学 信息工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要：文中设计并实现了一种基于 UWB 技术的矿井人员安全保障系统，该系统通过集成高精度定位、环境监测和生理监测功能，显著提升了矿井安全管理的智能化水平。系统由数据采集层、处理分析层和应用显示层三层构成，核心处理单元为 STM32F103C8T6 开发板，支持无线和有线双通信模式，能够确保数据传输的稳定性。UWB 定位模块能够实现厘米级精度定位，其自动和手动报警功能提高了应急响应能力。该系统为矿业安全提供了创新的技术方案，对预防矿井事故和保障矿工安全具有重要意义。

关键词：UWB 技术；矿井人员安全保障；高精度定位；双通信模式；环境监测与生理监测；应急响应能力
中图分类号：TP277 **文献标识码：**A

0 引言

随着矿业的不断发展，矿井作业环境愈发复杂，矿井作业安全问题逐渐凸显出来^[1]，矿工的安全保障问题成为社会关注的焦点。矿井事故往往造成严重的人员伤亡和财产损失，还对社会稳定 and 经济发展产生深远影响^[2]。因此，建立一个高效、可靠的矿井人员安全保障系统，对于预防事故、保障矿工生命安全、提高矿业生产效率具有重要意义。

近年来，伴随着物联网（IoT）、超宽带（UWB）定位技术、无线通信、大数据等技术的高速发展^[3]，为矿井安全监测提供了新的解决方案。这些技术的应用，使得矿井环境监测、人员定位、健康监测、紧急报警等功能得以实现，有效提升了矿井安全管理的智能化水平^[4]。

本文旨在介绍一种基于 UWB 技术的矿井人员安全保障系统，该系统集成了多种传感器、通信模块和数据处理技术，能够实现对矿井环境和矿工状态的实时监测、精确定位和智能预警。通过对系统的设计与实现进行详细阐述，探讨其在提高矿井安全管理效率、降低事故发生率方面的潜力和价值。我们期望该系统能够为矿业安全领域提供新的思路和技术支持，为矿工的生命安全和矿业的可持续发展贡献力量。

1 UWB 技术

1.1 UWB 技术简介

UWB（Ultra-Wideband）即超宽带技术，是一种新兴的无载波通信技术^[5]，利用纳秒至皮秒级的非正弦波窄脉冲传输数据。其原理是通过发射极短的脉冲来产生超宽的频带，从而实现高速数据传输。UWB 技术具有定位精度高、发射功率低、安全性高、抗干扰性强等优点^[6]。它能够实现厘米级的定位精度，适用于复杂环境中的精确距离测量和定位，同时由于其低功耗特性，使得设备可以长时间工作，减少了维护成本。

1.2 UWB 技术优势

UWB 技术在矿井应用中的优势如下：

（1）高精度人员定位：能够精确地确定每位矿工的位置，误差可控制在厘米级范围内，这对于紧急情况下的救援工作至关重要。

（2）复杂环境适应性强：矿井环境复杂，存在大量的障碍物和反射面，容易产生多径效应。UWB 技术的强抗干扰能力和良好的穿透性使其能够在这样的环境中稳定工作。

（3）低功耗与长寿命：UWB 设备的低功耗特性，使得矿工携带的标识卡等设备可以长时间工作，减少了频繁更换电池的麻烦和成本。

收稿日期：2025-03-24

基金项目：宁夏自然科学基金重点项目（2024AAC02011）

(4) 高安全性数据传输: UWB 技术的高安全性保证了矿井安全数据在传输过程中的保密性和完整性,防止了数据被恶意截取和篡改。

2 系统设计

该系统由数据采集与传输层、数据处理与分析层、应用与显示层构成。数据采集与传输层负责采集矿井环境和矿工生理参数等数据,并通过无线传输发送到数据处理中心。数据处理与分析层接收数据后进行存储、分析和处理,实现智能预警和决策支持。应用与显示层则通过监控平台和移动应用等设备,以直观的方式展示矿井安全状况和矿工工作状态,方便管理人员实时掌握情况并做出决策。图 1 为系统整体部署图。

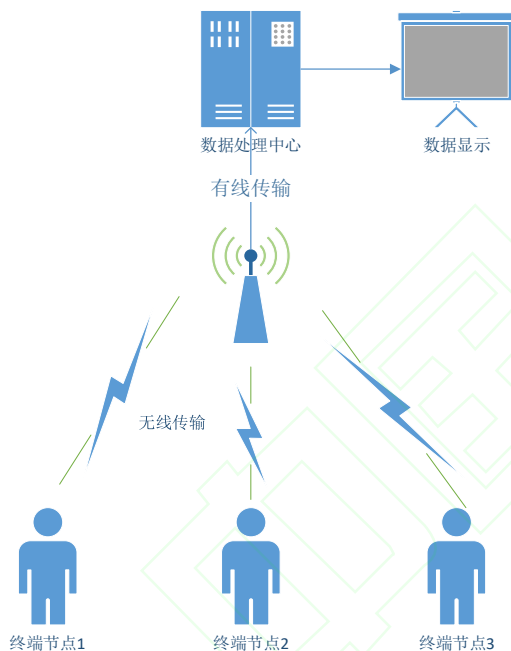


图 1 系统整体部署图

3 数据采集与传输层

3.1 基于分布式监控的 WSN 系统设计

为了更直观地展示数据采集与传输层的工作机制和数据流动过程,图 2 提供了该层的详细流程。该流程图概述了从环境和生理参数的采集开始,到数据通过无线和有线方式传输至数据处理中心的全过程。

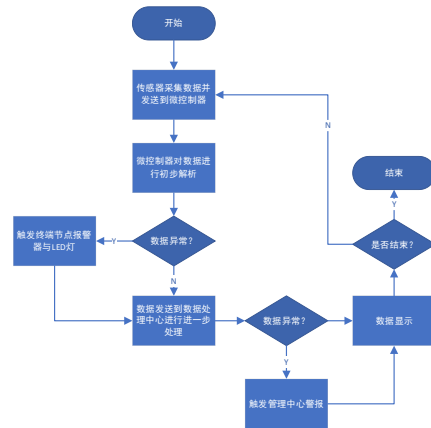


图 2 数据采集流程

3.2 数据采集模块

3.2.1 心率血氧传感器

心率血氧传感器采用 MAX30102,其采用光电容积脉搏波描记法 (PPG),通过发射红光和红外光穿透皮肤,测量光在血管中的反射或吸收变化。它包含两个 LED 和光电探测器,能够在不同波长下工作,从而提高测量的准确性。此外,该传感器尺寸小,集成了氧饱和度和心率监测功能,能够同时实现这两种功能,节约空间与成本^[7],非常适合在矿井环境中长时间监测矿工的生理状态,确保其安全。

3.2.2 温湿度传感器

温湿度传感器采用 DHT22,原理是基于内置热敏电阻和电容式湿度传感器测量周围的空气湿度和温度^[8]。湿度敏感元件通过测量空气中水汽分子对电容的影响来确定相对湿度,而温度敏感元件则通过热敏电阻的阻值随温度变化的特性来测量环境温度。DHT22 传感器因其出色的性能和可靠性而被广泛选用。它具有宽广的测量范围,能够适应矿井中极端的温度和湿度条件。DHT22 提供高精度的测量结果,温度精度可达 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度精度可达 $\pm 2\%\sim 5\%\text{RH}$,确保了数据的可靠性。此外,该传感器响应速度快,能够及时反映环境变化,且稳定性好,适合长期在恶劣环境中使用。

3.2.3 多气体检测器

在矿井中对瓦斯和一氧化碳的监测必不可少,考虑到环境因素,选择了华瑞 (RAE Systems) 多气体检测仪,其采用电化学或红外 (IR) 等传感技术,能够同时检测包括甲烷 (CH_4) 和一氧化碳 (CO) 在内的多种气体。其工作原理基于气体分子对特定传感器材料的电化学反应或红外光吸收特性,从而准确测量气体浓度。选用该型号的优势在于其集

成的无线通信功能,支持远程监控和实时数据传输,便于矿井安全管理。此外,该设备具有高精度和快速响应时间,能够在恶劣环境下稳定运行,且具备长电池寿命和用户友好的界面,适合长时间监测矿井安全。

3.3 UWB 定位模块

3.3.1 UWB 定位原理

UWB 定位技术通过测量信号的飞行时间 (Time of Flight, ToF) 来确定标签 (Tag) 与基站 (Anchor) 之间的距离。在矿井环境中,部署多个 UWB 基站,每个基站都能与佩戴在矿工身上的 UWB 标签进行通信。通过至少三个基站的三角测量,可以精确计算出标签的位置。

3.3.2 系统组成

UWB 标签: 每个矿工携带的小型设备,负责发送 UWB 信号。

UWB 基站: 部署在矿井关键位置的固定设备,用于接收来自标签的信号并计算距离。

数据处理单元: 负责收集所有基站的数据,进行位置计算和数据融合。

3.3.3 技术优势

高精度定位: UWB 技术能够实现厘米级的定位精度,这对于紧急情况下的快速救援至关重要。

强抗干扰能力: UWB 信号的宽频带特性使其在复杂环境中具有较强的抗干扰能力。

低功耗: UWB 设备通常具有较低的功耗,适合长时间运行在电池供电的便携式设备上。

高安全性: UWB 通信的安全性高,能够有效防止数据被截获和篡改。

3.4 通信模块

本系统采用双通信模式,结合了无线 WiFi 和有线通信技术,以确保数据传输的稳定性和可靠性。无线 WiFi 模块负责将终端节点采集的数据传输到数据处理中心,适用于矿井内移动设备的数据回传,提供灵活的数据通信能力。有线通信则作为数据传输的主干,通过工业以太网或光纤网络,确保关键数据的高速、稳定传输。这种双模式通信策略既利用了无线通信的便捷性,又发挥了有线通信的高可靠性,为矿井安全监测系统提供了坚实的通信保障。

3.5 报警模块

报警模块集成自动和手动触发功能。自动模式下,STM32 监测异常时激活声光报警和 LED 灯;手动模式配备紧急按钮,供矿工自主报警。警报通过无线传输至数据处理中心,确保快速应急响应,保障矿工安全。

3.6 STM32 开发板

在本系统中,选用 STM32F103C8T6 作为核心处理单元。这款基于 ARM Cortex-M3 内核的开发板具备高度集成的外设和完善的软件支持^[9]。STM32F103C8T6 拥有丰富的外设接口,包括两个 I²C 接口、三个 USART 接口和一个 SPI 接口,能够方便地与心率血氧传感器、温湿度传感器、多气体检测器以及 UWB 定位模块等设备连接。此外,该开发板具有高性能、低功耗、开发简便以及高度可靠的特点^[10],使其非常适合电池供电的便携式设备,满足矿井环境下长时间运行的需求。STM32F103C8T6 的稳定性和可靠性经过广泛验证,是实现矿井安全保障系统的理想选择。

4 数据处理与分析层

数据处理与分析层是系统的智慧核心,负责接收来自数据采集与传输层的原始数据。该层利用先进的数据处理算法和分析模型,对数据进行清洗、校验、存储和分析。其主要任务包括识别异常模式、预测潜在风险以及生成安全报告。通过应用机器学习和数据挖掘技术,该层能够提供智能预警,辅助决策支持系统,确保矿井安全运营。分析结果将与应用与显示层提供数据支撑,供管理人员实时监控和应急处理。

5 应用与显示层

应用与显示层负责将数据处理与分析层的结果转化为用户友好的界面。通过监控平台和移动应用,管理人员可以实时查看矿井环境数据、矿工位置和生理状态。该层还集成了报警系统,确保在检测到异常时能够迅速通知相关人员。此外,提供定制报告和分析工具,辅助管理人员进行安全审计和决策。这一层次的设计重点在于提升用户体验,确保信息的及时传递和易理解性,从而有效支持矿井安全监控和管理。

6 功能实现

本系统通过集成多种先进技术,成功实现了对矿井环境

的全面监测和矿工的安全保障。系统的核心功能包括：

环境监测：通过高精度传感器实时监测矿井中的甲烷、一氧化碳、温湿度等关键环境参数，确保工作环境的安全。

人员定位：利用 UWB 技术对矿工进行精确定位，即使在复杂的环境中也能实现厘米级的定位精度，为紧急情况下的快速救援提供支持。

健康监测：通过佩戴式心率血氧传感器监测矿工的生理状态，及时发现健康异常，预防职业病的发生。

自动报警：当监测到环境参数超标或矿工生理指标异常时，系统自动触发报警，并通过声光报警器和 LED 灯提醒矿工，同时通知管理人员。

数据通信：采用无线 WiFi 和有线通信相结合的方式，确保数据传输的稳定性和实时性，即使在信号不佳的矿井深处也能保持通信畅通。

远程监控与管理：管理人员可以通过监控平台或移动应用远程查看矿井的安全状况，实现对矿井安全的实时监控和管理。

智能预警与决策支持：数据处理与分析层通过应用机器学习算法对收集的数据进行分析，提供智能预警和决策支持，提高矿井安全管理的科学性和有效性。

创新点包括：

(1) 利用 UWB 技术实现厘米级高精度定位，为紧急救援提供可靠位置信息；

(2) 集成多气体传感器与 STM32 开发板，实现多参数实时监测与自动报警；

(3) 采用 WiFi 与有线通信双模式，确保数据传输的稳定性与可靠性；

(4) 开发移动监控应用，使管理人员能够远程实时监控矿井安全状况；

(5) 应用数据处理与分析层的智能预警算法，提高事故预防能力；

(6) 设计用户友好的应用与显示层，增强信息传递的

直观性和响应速度。

7 结 语

本文详细介绍了一种基于 UWB 技术的矿井人员安全保障系统，该系统集成了先进的传感器技术、无线通信以及智能数据处理算法，实现了对矿井环境和矿工生理状态的全面监测。通过高精度定位、多参数环境监测和实时健康监测，本系统极大地提高了矿井安全管理的效率和响应速度。创新的双通信模式和智能预警机制，不仅增强了系统的可靠性和准确性，也为矿工提供了更加坚实的安全保障。展望未来，随着技术的不断进步和应用的深入，本系统有望在矿业安全领域发挥更大的作用，为矿工的生命安全和矿业的可持续发展做出积极贡献。

参 考 文 献

- [1]梁懿.基于 5G 技术的矿井安全预警系统研究[J].内蒙古石油化工,2024,50(11):62-65.
- [2]韩金.煤矿水害防治中定向钻探注浆技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(5):25-27.
- [3]宋欣霓,张峥嵘,左宇驰,等.基于 STM32 和华为云平台的宿舍智能水电监测系统设计[J].物联网技术,2025,15(4):5-10.
- [4]周建.基于“一通三防”的矿井智能管控技术研究与应用[J].中国煤炭,2024,50(6):59-66
- [5]周伯宇.基于 UWB 技术的井下人员定位方法研究[D].唐山:华北理工大学,2023.
- [6]冯伟财,刘晓杰.一种基于小波变换的超宽带协同定位算法研究[J].科技与创新,2024(18):23-26.
- [7]于卓含.智能消防头盔系统中相关技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [8]陈杨灵,周陈乾,高宇霄,等.基于物联网的空气质量监测系统的设计[J].信息与电脑(理论版),2023,35(11):164-166.
- [9]苏坤劫,杨晨,杜亚蕾,等.煤矿井下多传感器的数据采集和无线传输设计[J].电子制作,2025,33(2):7-9.
- [10]施树慧,王宇沁,杨颖.智能心率及摔倒检测系统研究[J].信息与电脑,2024,36(24):88-90.

作者简介：白晓轩（2001—），男，在读硕士研究生，研究方向为物联网技术。

冯 锋（1971—），男，博士，教授，研究方向为信息系统工程、物联网技术及应用