

煤矿井下有害气体 安全监控系统的设计及测试性研究

袁铭浩 耿民 徐龙
(枣矿集团高庄煤业有限公司, 山东 济宁 277000)

摘 要 针对煤矿井下有害气体监控中存在的实时性不足、数据传输稳定性差、能耗高等问题, 基于“SGA-100 系列气体检测模块”, 设计一种煤矿井下有害气体安全监控系统, 并在高庄煤业井下环境进行测试性研究。系统架构由数据层、传输层和应用层组成, 各层协同工作, 通过引入灰色关联分析方法, 能实现 H₂S、CO、NO、Cl₂ 等有害气体浓度的实时监测与预警, 确保数据采集、传输与处理的高效性与可靠性。测试结果表明, 在高采样速率下能保持稳定的数据采集速率, 且传感器节点平均能耗随数据采集次数增加而下降, 能有效解决传统监控系统在复杂环境中的布线困难、数据处理滞后和能耗高等问题, 为煤矿安全生产提供了可靠的技术支持, 显著提高矿井安全管理水平。

关键词 无线传感器网络; 安全监控; 有害气体; 灰色关联分析; 能耗

中图分类号 TD76 文献标识码 B doi:10.3969/j.issn.1005-2801.2025.01.031

Design and Testing Research of Harmful Gas Safety Monitoring System in Coal Mine Underground

Yuan Minghao Geng Min Xu Long
(Gaozhuang Coal Industry Co., Ltd., Zaozhuang Mining Group, Jining 277000, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient real-time performance, poor data transmission stability, and high energy consumption in the monitoring of harmful gases in coal mines, a safety monitoring system for harmful gases in coal mines is designed based on the "SGA-100 series gas detection module", and tested in the underground environment of Gaozhuang Coal Industry. The system architecture consists of a data layer, a transmission layer, and an application layer, which work together. By introducing the grey relational analysis method, real-time monitoring and early warning of harmful gas concentrations such as H₂S, CO, NO, Cl₂ can be achieved, ensuring the efficiency and reliability of data collection, transmission, and processing. The test results show that a stable data acquisition rate can be maintained at high sampling rates, and the average energy consumption of sensor nodes decreases with the increase of data acquisition times. This can effectively solve the problems of wiring difficulties, data processing lag, and high energy consumption in traditional monitoring systems in complex environments, providing reliable technical support for coal mine safety production and significantly improving the level of mine safety management.

Key words: wireless sensor network; safety monitoring; harmful gas; grey correlation analysis; energy consumption

煤矿井下作业环境复杂, 存在着 H₂S、CO、NO、Cl₂ 等多种有害气体, 这些有害气体一旦浓度超标, 将严重威胁工人健康, 并可能引发爆炸或窒息等重大安全事故^[1]。当前, 煤矿井下有害气体监控主要依赖于有线监测系统和手持检测设备。有线监测系统安装复杂、维护困难、成本较高^[2]; 手持

检测设备需要人工操作, 实时性和连续性差, 难以满足现代化煤矿安全管理的需求^[3]。为解决这些问题, 本研究基于深国安电子开发的“SGA-100 系列气体检测模块”, 设计了一种煤矿井下有害气体安全监控系统。该系统通过无线传感器节点实现对 H₂S、CO、NO、Cl₂ 等气体的实时监测, 利用灰色关联分析方法对数据进行分析与预警, 并在高庄煤业井下环境中进行了测试性研究, 旨在验证系统在复杂环境下的性能, 包括数据采集稳定性、传输可靠性和能耗表现。研究结果表明, 基于“SGA-100

收稿日期 2024-07-31
作者简介 袁铭浩(1998—), 男, 山东滕州人, 2020 年毕业于山东科技大学安全工程专业, 本科, 助理工程师, 研究方向: 煤矿安全监测。

系列气体检测模块”的安全监控系统在高采样速率下，能够保持稳定的数据采集速率，且传感器节点平均能耗随数据采集次数增加而逐步下降。该系统有效克服了传统监控系统在布线复杂、能耗高、数据处理滞后等方面的不足，为煤矿井下有害气体监控提供了科学依据和技术支持。

1 有害气体安全监控系统总体结构

设计的煤矿井下有害气体安全监控系统总体架构如图 1 所示。该系统基于无线传感器网络，通过“SGA-100 系列气体检测模块”实现对井下有害气体的监测和预警，架构由数据层、传输层、应用层三部分组成，各部分协同工作，共同实现对有害气体的实时监测和安全预警^[4]。

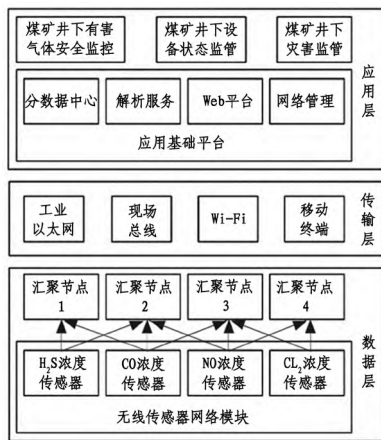


图 1 有害气体安全监控系统架构示意图

1.1 数据层

数据层是整个系统的核心部分，由无线传感器网络模块和汇集节点组成。无线传感器网络模块采用“SGA-100 系列气体检测模块”，包括 H₂S 浓度传感器、CO 浓度传感器、NO 浓度传感器、Cl₂ 浓度传感器组成，布置在煤矿井下各个关键位置，负责实时采集环境中的 H₂S、CO、NO、Cl₂ 有害气体数据。每个传感器节点均配备相应气体传感器和无线通信模块，能够将采集的数据通过无线信号传输至汇聚节点^[5]。

汇聚节点功能是接收来自多个无线传感器节点的数据，对数据进行初步处理和汇总。汇聚节点采用高性能处理器，能够高效地处理大量数据，并通过有线或无线方式将数据传输至监控中心。

1.2 传输层

传输层由工业以太网、现场总线、Wi-Fi、移动终端等组成。该传输层采用无线有线相结合组网模式，将数据层中汇集节点打包数据通过工业以太网

及现场总线传输至应用层。基于煤矿井下环境的特殊性，设计的无线有线相结合组网模式能有效确保数据传输的稳定性和可靠性。

1.3 应用层

应用层由煤矿井下有害气体安全监控、煤矿井下设备状态监控、煤矿井下灾害监管、应用基础平台四部分组成。应用基础平台由数据中心、解析服务、Web 平台等组成。煤矿井下有害气体安全监控模块从传输层接收到数据层传输来的 H₂S、CO、NO、Cl₂ 有害气体数据，并对数据进行存储、处理和分析。配备有高性能服务器和数据库系统，能够对接收到的大量数据进行存储和管理；通过关联分析法和其他数据处理算法，能够实时分析有害气体的浓度变化，生成相应监控报告。煤矿井下有害气体安全监控模块与预警系统紧密结合，当检测到有害气体浓度超标或变化异常时，预警系统会立即发出警报。预警系统包括声光报警设备、短信通知系统和应急响应机制，确保工作人员能够及时收到预警信息并采取必要防护措施^[6]。

上述功能模块相互配合，有害气体安全监控系统能够实现对有害气体全面、实时监控，在有害气体浓度超标时及时预警，有效保障工人安全，减少安全事故发生。

2 有害气体安全监控系统硬件设计

2.1 煤矿井下无线传感器网络模块

在煤矿井下有害气体监控系统中，传感器的选择至关重要，直接影响数据采集准确性和系统可靠性。无线传感器网络模块包含有大量布设于待监控区域的无线传感器节点，其体系结构如图 2 所示。无线传感器节点由无线通信、微控制器、数据采集处理、供电共四个单元组成。

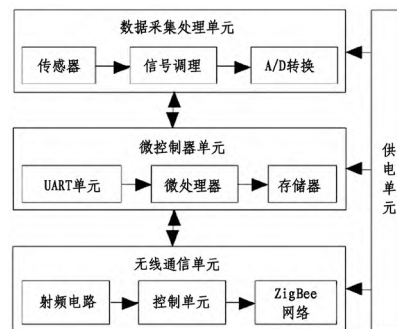


图 2 无线传感器节点体系结构示意图

数据采集处理单元是无线传感器节点核心部分，采用“SGA-100 系列气体检测模块”实现对煤矿井下有害气体的采集和处理。该模块支持实时监

测 H_2S 、 CO 、 NO 、 Cl_2 等气体，传感器具有反应灵敏、寿命长久等特点。具体传感器选型如下： H_2S 传感器选用 CITY， CO 传感器选用 HONEYWELL， NO 传感器选用 MEMBRAPOR， Cl_2 传感器选用 FIGARO。

微控制器单元用于管理传感器节点的各项功能，负责数据的初步处理、存储和控制无线通信单元的工作。该单元包含以下组件：UART 单元，用于串行通信，连接微处理器和其他外设；微处理器，作为节点的核心控制器，执行数据处理、系统控制等任务；存储器，用于存储采集到的数据、控制程序和临时数据。

无线通信单元支持节点之间的无线通信，实现数据的传输和接收。该单元包括以下组件：射频电路，负责发送和接收无线信号，通常采用低功耗设计以延长电池寿命；控制单元，负责管理无线通信协议的实现和控制信号的处理；ZigBee 网络，采用 ZigBee 无线通信协议，具有低功耗、低延迟和高可靠性特点。

供电单元是传感器节点运行能量来源，通常采用电池供电，设计有低功耗模式以延长电池寿命。该单元包括：电源管理，负责电池电量监测和管理，确保节点在低电量时能够正常运行；电源接口，用于连接外部电源或充电设备，方便在必要时对电池充电。

无线传感器节点通过数据采集处理单元获取煤矿井下的有害气体数据，利用微控制器单元进行数据处理和管理，通过无线通信单元实现数据的无线传输，并由供电单元提供所需的能量。各单元之间协调工作确保了传感器节点的高效运行，提供稳定、准确的有害气体监控数据，为煤矿井下安全监控提供坚实的技术基础。

2.2 煤矿井下汇聚节点结构

汇聚节点体系结构如图 3 所示。核心处理单元为 Philips LPC2292 微处理器，存储单元采用 SDRAM 的 IS61LV25616AL 和 FLASH 的 SST39VF160 存储器。无线传输单元选用 CC2420 芯片及天线，有线传输单元选择 CS8900A 芯片，均满足 ZigBee 技术要求，能有效实现传感器节点及监控主机间的通信。

核心处理单元是汇聚节点核心部分，负责整个节点控制与数据处理。LPC2292 处理器具有以下特点：1) 16/32 位架构。处理器采用 16/32 位架构，

兼顾处理能力和能耗效率；2) 主频 60 MHz。高达 60 MHz 主频确保了系统的高速数据处理能力；3) 高速存储器。内置高速存储器，加快了数据处理速度，满足实时数据处理需求；4) 多种接口。处理器提供 GPIO、串口、JTAG 等多种接口，方便与其他单元进行连接和通信。

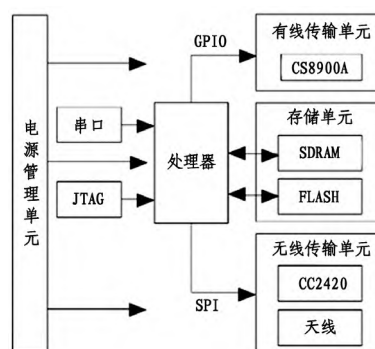


图 3 汇聚节点体系结构示意图

存储单元用于存储数据、程序代码和临时数据。扩展存储芯片采用 SST39VF160 和 IS61LV25616AL，配置如下：SDRAM，用于存储临时数据和运行时的程序数据，提供快速读写能力；FLASH，用于存储程序代码和重要数据，具有掉电不丢失数据的特点。

无线传输单元负责实现与传感器节点的无线通信，采用 CC2420 芯片，具有以下特点：1) 支持 ZigBee 协议。CC2420 芯片完全支持 ZigBee 协议，适用于低功耗无线传感器网络。2) 射频电路。内置射频电路，支持高效的无线数据传输。3) 天线接口。提供天线接口，确保信号传输稳定性和覆盖范围。

有线传输单元用于实现与监控主机的有线通信，采用 CS8900A 芯片，配置如下：以太网控制器，CS8900A 作为以太网控制器，支持标准以太网协议，确保高效、稳定的数据传输；SPI 接口，通过 SPI 接口与处理器连接，进行数据传输和控制信号交换。

电源管理单元负责为汇聚节点的各个单元提供稳定的电源，配置如下：电源转换，负责将外部电源转换为各个单元所需的电压等级；功耗管理，对各单元的功耗进行实时监控和管理，确保系统在不同工作模式下的能耗始终保持在合理范围内。

汇聚节点通过核心处理单元的高效数据处理能力，无线传输单元和有线传输单元的稳定通信，实现了对煤矿井下有害气体数据的高效聚集和传输。各个组成部分的协调工作，确保系统的高效性、可靠性和低功耗，为安全监控提供坚实的技术保障。

3 有害气体安全监控系统软件设计

3.1 煤矿井下有害气体监测数据统计及关联分析

在煤矿井下,有害气体监测数据的统计与关联分析对保障工人安全和优化矿井通风系统至关重要。通过时间序列分析,可以发现有害气体浓度在不同时刻的关联性。具体操作包括将监测数据组成样本数据组,利用方差和均值作为统计参数,提取统计特征。样本数据组通过均值标准化处理,以消除数据波动的影响。

在关联分析中,通过计算灰色关联度来描述样本间的关联性。灰色关联度计算公式涉及两个均值标准化样本的相关系数,衡量样本间的相似度。计算不同样本之间的灰色关联度,有助于理解有害气体浓度变化规律,为煤矿安全管理提供科学依据。这种方法不仅能帮助快速识别异常气体浓度变化,提前采取预防措施,还可以通过历史数据分析优化矿井通风系统,提高整体安全水平。

3.2 煤矿井下有害气体浓度预警

煤矿井下有害气体的浓度预警是保障工人安全和矿井正常运行的重要措施。通过实时监测数据与历史数据的关联分析,可以及时发现异常情况,采取有效措施,预防事故发生。

首先,设煤矿井下有害气体浓度时间序列为 $\{x_i|t=1,2,\dots,N_x\}$ 。实时监测值所在的有害气体浓度样本记为 X^* 。通过前述方法计算全部样本数据的灰色关联度,可以获得关联度矩阵 $R=(r_{ij})n \times n$ 。

关联度矩阵 R 的计算过程如下:依据公式对样本数据进行均值标准化,依据公式计算各样本间的灰色关联度,依据公式汇总计算结果,得到关联度矩阵 R 。

为便于后续分析,需要计算关联度矩阵 R 平均值。步骤如下:对关联度矩阵 R 所有元素求平均值,得有害气体浓度时间序列样本灰色关联度均值 μ_r :

$$\mu_r = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}$$

在实际监测中,实时监测值所在有害气体浓度样本与关联变量样本的灰色关联度序列为 $\{r_i|i=1,2,\dots,n\}$ 。为了判断实时监测数据的异常情况,需要计算该序列的灰色关联度均值 μ_r' :

$$\mu_r' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i'$$

通过比较实时监测值的灰色关联度均值 μ_r' 与历史数据的灰色关联度均值 μ_r ,可以分析煤矿井下有

害气体浓度的异常状况。基本判断标准如下:当 μ_r' 显著低于 μ_r 时,表明当前有害气体浓度存在异常,可能需要立即采取措施。当 μ_r' 与 μ_r 相近时,表明当前有害气体浓度处于正常范围内。通过这种方法,可以实现对煤矿井下有害气体浓度的实时预警,确保及时发现并处理潜在的危险情况,提高矿井的安全管理水平^[7]。

以上方法通过时间序列分析和灰色关联度计算,实现对煤矿井下有害气体浓度的有效监测和预警。结合实时监测数据与历史数据的关联分析,可以及时发现异常情况,为煤矿安全管理提供科学依据。此方法具有较高的实用性和可靠性,有助于提高矿井的整体安全性和运行效率。

4 系统测试

4.1 数据采集效率与传输可靠性

基于无线传感器的煤矿井下有害气体安全监控系统完成设计后,在高庄煤业井下环境中进行了测试性研究,在西五采区部署无线传感器节点,对 H_2S 、 CO 、 NO 、 Cl_2 有害气体数据进行实时监测。

实验共设置11个待监控区域,布置有300个无线传感器节点,采集 H_2S 、 CO 、 NO 、 Cl_2 四类有害气体数据。不同采样速率设置值下,系统应用前后有害气体实时数据采集速率如图4。

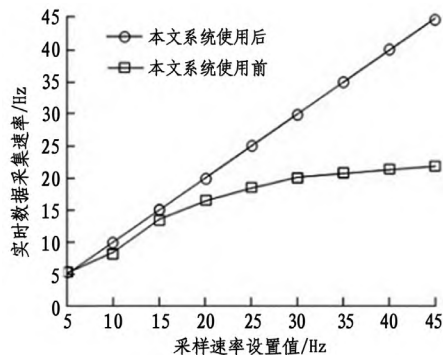


图4 系统使用前后实时数据采集速率曲线图

采样速率设置为5 Hz时,系统应用前后有害气体实时数据采集速率均与设置值相同,在低采样速率下两者数据采集速率保持相同。当采样速率设置值从10 Hz提高45 Hz时,数据采集速率开始出现偏差,系统使用前的数据采集速率则逐渐偏离设置值,尤其是在更高采样速率下,偏差显著增大。这表明,传统系统在高采样速率下存在数据采集延迟和不准确的情况,而采用实验所用系统则能有效解决这一问题。

测试结果表明,系统在不同采样速率设置值下,

尤其是高采样速率条件下，均能实现高效、准确的煤矿井下有害气体实时数据采集。这一性能确保了有害气体安全监控的实时性要求，避免了传统系统可能出现的数据采集延迟现象。通过系统的应用，煤矿管理者能够及时掌握矿井内有害气体浓度的变化，快速响应潜在的危险情况，保障工人的生命安全，为煤矿的安全生产提供了有力的数据支持和技术保障，提高了矿井整体管理的智能化水平。

4.2 系统能耗分析

在煤矿井下环境中，实时监测有害气体浓度的无线传感器节点数量和能耗是系统设计的重要考量因素。通过实验分析不同数量的无线传感器节点在不同数据采集次数下的平均能耗情况，评估系统的能效表现。

系统测试实验中，在高庄煤业西五采区、西十一采区、西十三采区无线传感器节点数量分别设置为50、100、150个，测试系统在不同区域有害气体数据采集次数下平均能耗，如图5。

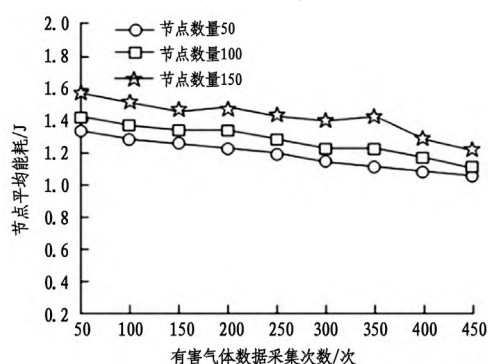


图5 无线传感器节点平均能耗曲线

从图5可知，随着有害气体数据采集次数增加，不同数量无线传感器节点平均能耗均表现出平稳下降趋势。表明随着数据采集次数的增加，节点能耗逐渐趋于稳定，能耗水平有所降低。在相同的数据采集次数下，无线传感器节点数量越多，相应的节点平均能耗越大；然而，能耗增加的幅度很小，表明节点数量对平均能耗的影响相对较小。系统中无线传感器节点平均能耗受节点数量影响小，与有害气体数据采集次数之间呈反比关系。因此，该系统在采集大量有害气体数据时能够保持较低的能耗，满足实际应用中的低能耗要求。

综述，系统设计的无线传感器节点在不同数量和不同数据采集次数下均表现出较高的能效水平，能耗随数据采集次数的增加而降低。系统在增加传感器节点数量时，能耗虽有增加但幅度很小，表明系统具有良好的扩展性，能够在不显著增加能耗的

情况下扩展节点数量，以覆盖更大的监控区域。节点能耗的稳定性和低能耗表现确保了系统在长时间运行中的可靠性和持续性，有助于实现煤矿井下有害气体的实时、安全监控。设计的无线传感器系统在实际应用中能够实现高效的数据采集和实时监控，能够有效控制能耗，保障系统的长时间稳定运行。

5 结论

本研究设计了一种基于无线传感器的煤矿井下有害气体安全监控系统，该系统采用“SGA-100系列气体检测模块”，实现了 H_2S 、 CO 、 NO 、 Cl_2 等气体浓度的实时监测和预警。通过在高庄煤业井下环境的测试性研究，验证了系统的性能和适用性。测试结果表明：在高采样速率下，系统能够保持与设置值一致的数据采集速率，有效解决传统系统在高采样速率下数据采集延迟和不准确的问题；随着数据采集次数的增加，传感器节点的平均能耗逐渐下降，系统的低能耗特性得以验证；节点数量对系统平均能耗的影响较小，显示出设计的井下有害气体安全监控系统在实时性、数据传输稳定性和能耗优化等方面具有显著优势。尽管本研究仍处于测试验证阶段，结果为系统的进一步实际应用提供了重要依据，同时为煤矿安全生产提供了科学支持和技术储备。

【参考文献】

- [1] 杨伟, 陈庆丰, 陈梦乔, 等. 超前深孔预裂爆破有害气体产生规律及治理[J]. 能源与环境, 2024, 46(04): 14-19.
- [2] 林世东. 煤矿矿井通风与安全监控系统存在的问题探析[J]. 矿业装备, 2024(04): 103-105.
- [3] 招健. 煤矿安全监控与防护系统的控制研究[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(11): 184-186+190.
- [4] 张佳乐, 宋占锋, 王久强. 基于无线传感器的煤矿井下有害气体安全监控系统[J]. 煤炭技术, 2022, 41(11): 130-132.
- [5] 张芳. 矿井安全监控与防护系统的控制研究[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(06): 186-188+198.
- [6] 李音. 铜川煤矿安全监控系统应用与分析[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(06): 110-112+106.
- [7] 徐自远, 姜宇. 基于无线网络的可穿戴式人体健康监测[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(09): 58-62.