

基于RS485总线的分布式气体检测系统设计

陶诗琦¹, 王代华^{1*}, 赵慧², 卫宁²

(1. 中北大学 极限环境光动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 晋西工业集团有限责任公司, 山西 太原 030027)

摘要: 针对云爆剂易挥发、易燃易爆的特性和当前对于战斗部装药过程中专用化气体泄漏检测系统研究尚显不足的问题, 设计了一种基于RS485总线的分布式气体泄漏检测系统, 整体由检测装置、数据总线、监控终端三部分组成, 各模块协同完成易燃易爆气体浓度的采集、处理、传输、分析与预警。系统硬件部分利用光离子化检测(Photo Ionization Detectors, PID)传感器, 并基于RS485总线, 设计了调理电路、模数转换器、存储器、单片机、总线驱动器及上位机模块, 搭建基于Qt的上位机软件平台, 实现初始化、状态查询、参数编程、数据采集、灵敏度标定、数据上传以及数据分析、信息显示、超限报警等功能。为验证系统性能, 在操作车间的存储区、计量区、混合区和浇注区分别布设检测装置并开展26h连续试验。结果表明: 系统能够以15min间隔稳定完成多节点气体体积分数采集与传输, 现场的气体体积分数整体处于 $0\sim 5\times 10^{-6}$ 范围内, 低于报警阈值 10×10^{-6} 。该系统具备较强的抗干扰能力、较高的检测灵敏度和良好的工程适用性, 能够实现无人值守状态下的全天候、实时高精度检测, 可为云爆战斗部的装药安全提供技术保障。

关键词: RS485总线分布式检测; 光离子化检测; PID传感器应用; 易燃易爆气体; 气体泄漏检测

中图分类号: TJ410.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0006

引用格式: 陶诗琦, 王代华, 赵慧等. 基于RS485总线的分布式气体检测系统设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0006.

TAO Shiqi, WANG Daihua, ZHAO Hui, et al. Design of Distributed Gas Detection System Based on RS485 Bus[J].

Journal of North University of China(Natural Science Edition), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0006.

Design of Distributed Gas Detection System Based on RS485 Bus

TAO Shiqi¹, WANG Daihua^{1*}, ZHAO Hui², WEI Ning²

(1. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

Abstract: Due to the volatile, flammable, and explosive characteristics of cloud explosive agents, as well as the limited research on dedicated gas leakage monitoring during the warhead loading process, a distributed gas leakage detection system based on the RS485 bus was developed. The system consists of detection units, a data bus, and a monitoring terminal, enabling the acquisition, processing, transmission, analysis, and alarm of flammable and explosive gas concentration data. In the hardware design, photoionization detector (PID) sensors and an RS485 communication architecture were adopted, and the signal conditioning circuit, analog-to-digital conversion module, memory module, microcontroller unit, bus

收稿日期: 2025-12-02

作者简介: 陶诗琦(2001—), 女, 硕士生, 主要从事测试计量技术及仪器的研究。

* 通信作者: 王代华(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事测试计量技术及仪器的研究。E-mail: wangdaihua@nuc.edu.cn。

driver, and host computer module were designed. In the software design, a Qt-based host computer platform was established to realize system initialization, status query, parameter configuration, data acquisition, sensitivity calibration, data upload, data analysis, information visualization, and over-threshold alarm functions. To verify the system performance, detection devices were set up in the storage area, measurement area, mixing area and pouring area of the production workshop, and a 26-hour continuous test was conducted. The results show that the system can stably complete the collection and transmission of multi-node concentrations at intervals of 15 min, and the overall volume fraction of the test gas on site is within the range from 0 to 5×10^{-6} , which is below the alarm threshold of 10×10^{-6} . The proposed system demonstrates strong anti-interference capability, high detection sensitivity, and good engineering applicability, and can provide reliable technical support for the safe loading of cloud explosive warheads through unattended, continuous, real-time, and high-precision monitoring.

Key words: RS485 bus distributed detection; photoionization detection; PID sensor application; flammable and explosive gases; gas leakage detection

0 引言

云爆弹(Fuel Air Explosive, FAE)的主装药为云爆剂。云爆剂是一种高能燃料,在一定起爆条件下云爆剂被抛撒开,与空气混合并发生剧烈爆炸^[1]。在燃料混合及存储过程中,由于原料的易挥发特性,内部云爆剂可能发生气化^[2]。而泄漏气体与空气融合后十分危险,一旦遇到明火或静电等引燃条件,爆炸随即发生。

近年来,面向工业安全的气体检测技术研究主要围绕提升精度、降低功耗、无线化与智能化四个方面展开。陈平^[3]基于光离子化技术研制了一种挥发性有机气体在线监测仪器,为环境保护可视化方面提供一种新思路;王云龙^[4]选用苯、二甲苯和甲醛等3个工业现场常见的VOCs(Volatile Organic Compounds)气体传感器构建传感器阵列,研制了一款新型的高精度低成本工业现场VOCs气体在线监测设备;王彪等^[5]基于近红外垂直腔面发射半导体激光器,并结合BP神经网络,实现了适应性较好的痕量一氧化碳气体检测;董小虎等^[6]采用密封取样的方式建立了一种气体检测测试装置,实现了云爆弹弹筒内泄漏硝酸异丙酯气体浓度的现场快速测试;李二赛^[7]利用改进型BP神经网络研究并设计了一种有害气体检测系统;夏飞等^[8]设计了一款以Arduino为主控板的易爆气体智能检测系统,通过蓝牙传输模块将检测数据传输至手机客户端;O'Brien等^[9]利用低功耗广域网与LoRa技术设计了气体检测系统,还通过云功能提供实时监控和预测能力。

当前研究工作主要集中于工业生产领域,并不适用于军工行业的产线应用。云爆剂操作车间金属结构密集,电磁环境复杂,无线信号传输衰减严重且存在防爆安全隐患,考虑到车间全域布设、系统适用性以及保密性需求等,无线组网并不适用于云爆剂操作车间这类军工应用场景。相比之下,有线组网具有高可靠性、强抗干扰性和确定的实时性^[10]。针对易燃易爆高危物料操作车间这一特定场景,目前尚缺乏一种集高可靠性有线网络、十亿分之一级高灵敏度检测及初步智能化数据处理于一体的专用气体泄漏检测系统。

针对上述问题,本文面向军工厂产线,设计了一套专用化的全域易燃易爆气体泄漏检测系统,采用基于RS485总线的有线分布式架构,结合光离子化传感器,设计基于Qt平台的上位机软件,不仅确保在全域复杂环境下数据传输的高可靠与实时性,还实现了十亿分之一级的高灵敏度检测,更通过集成本地非易失存储、软件可编程标定与阈值设定,使每个检测节点成为一个可长期无人值守运行的独立单元。该系统有效填补了在高危军工操作环境中,兼具高可靠性与检测高灵敏度、并能支撑无人值守的专用检测设备的空白。

1 系统整体设计

1.1 系统组成

燃料的混合与操作工作车间按功能划分为存储区、计量区、混合区与浇注区4个区域。与之相对应,气体检测系统也需要在每个区域布设传感器,并将测试结果上传至终端控制器,具备分布

式检测系统的典型特征。因此,检测系统采用分布式测试系统架构进行设计。检测系统总体由三部分组成:气体泄漏检测装置、远程监控终端和传输总线。整体结构框如图1所示。

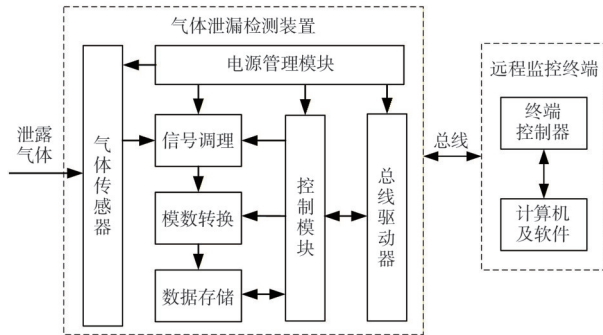


图1 系统整体结构框图

Fig. 1 Overall system structure block diagram

1.2 工作流程

上电后,首先进行初始化和自检,接着等待来自终端的数据采集指令,并在收到该指令后启动一次采集过程:

传感器检测目标空间内的气体组分,将所敏感气体的含量转换为电压输出。信号调理器对传感器输出的微弱信号进行放大,对噪声信号予以剔除。AD转换器在单片机的控制下,对模拟信号进行数字量化和编码。

PIC单片机对采集的数据进行计算,根据数字滤波算法进行数据处理,得出当前采样值对应的气体浓度值,然后通过驱动器及总线上传至终端。终端计算机接收数据并绘图显示,同步完成本地存储。若检测到浓度超限则启动报警,报警阈值可编程设定。

作为数据备份,采样数据实时存入检测装置内的存储器,该存储器具有掉电非易失特性。在突发事故情况下,回收检测装置,事后通过总线接口连接至计算机,依然可以回收存储数据,作为事故分析的依据。

2 系统硬件设计

2.1 气体传感器选型

气体传感器是一种将某种气体体积分数转化成对应电信号的转换器。根据不同的工作原理,可以分为:半导体式、接触燃烧式、电化学式以及光离子化气体传感器等^[11]。PID传感器是指以紫外光离子化检测技术为工作原理的传感器,由紫外光源和气室构成。可以检测 $10 \times 10^{-9} \sim 10\,000 \times 10^{-6}$ 的体积分数的挥发性有机物和其他有毒气体^[12]。

与其他传感器相比,PID传感器量程覆盖 $100 \times 10^{-9} \sim 200 \times 10^{-6}$,最低检测限为 10×10^{-9} ,灵敏度最低范围为 $6 \text{ mV}/10^{-6}$,在整个量程范围内线性度良好,响应时间为2 s,能够迅速捕捉到气体浓度的变化。同时,其具有体积小、重量轻等特点,以及耐湿和防污染设计,能够在复杂环境下保持稳定运行。而且具有无损检测、实时检测和连续检测等优点^[13-14],既能够覆盖正常背景浓度下的微弱变化,也能够满足异常泄漏情况下的快速响应需求,因此更适合作为本系统的前端敏感元件。本系统选用Alphasense公司的PID-AR5型气体传感器,针对低碳链烷烃、烯烃及芳香烃等云爆剂主要挥发组分具有高灵敏度,PID-AR5核心性能参数见表1。

表1 PID-AR5核心性能参数表

Tab. 1 Core performance parameters table of PID-AR

最低检测体积分数	线性范围	超量程	分辨率	灵敏度典型范围/ ($\text{mV} \cdot 10^6$)	响应时间/s	光源寿命/h	工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	工作湿度 (RH)/%
10×10^{-9}	200×10^{-6}	200×10^{-6}	$<0.05 \times 10^{-6}$	11	2	$\geq 6\,000$	$-20 \sim 60$	0~95

2.2 信号调理模块

信号调理模块对传感器输出的微弱信号进行滤波和放大处理,由放大电路和滤波电路组成,通过放大电路增强信号幅度,以便有效地驱动负载,通过滤波电路去除干扰,确保信号质量。本系统选用RC滤波电路以及同相比例放大电路^[15]。根据选用的PID气体传感器输出的电压范围,以及选用的AD

电压输入范围,设定放大倍数为1.43倍。滤波环节主要抑制工频耦合噪声及高频尖峰干扰,截止频率选取在10Hz量级,以兼顾动态响应和噪声抑制。该设计既保证了对微弱信号采集精度,又避免了现场复杂电磁环境对测量结果的显著影响。

2.3 模数转换模块

模数转换模块负责将调理电路输出的模拟信

波特率条件下可满足百米级传输距离需求;同时通过 $120\ \Omega$ 终端匹配、电缆屏蔽层单点接地及主从式轮询通信机制,可进一步降低反射干扰和串扰,从而保证多节点采集的稳定性与实时性。

2.7 电源管理模块

整个检测系统的组成电路复杂,为保证各模块正常供电以及本安设计要求,内部的电源管理模块采用了电压转换技术和电子保险丝技术,实现欠压、过压、短路、过流保护等功能,降低了检测装置的整体功耗及安全风险。

由于云爆剂操作车间提供的工作电压为 $24\ \text{V}$,而各功能模块均采用 $3.3\ \text{V}$ 供电,因此需要设计电源转换模块,将输入的 $24\ \text{V}$ 电压转换为稳定的 $3.3\ \text{V}$ 电压输出,本系统采用低压差线性稳压器实现电压转换。此外,采用TI公司的电子保险丝作为电源保护器件,其高度集成化的设计不仅降低了系统外围电路复杂度,还显著提高了电源系统的安全性及可靠性。

3 监控终端设计

监控终端用于汇总现场各检测点装置的测试数据并进行融合处理。监控终端由终端控制器、计算机及数据处理软件组成,如图4所示。

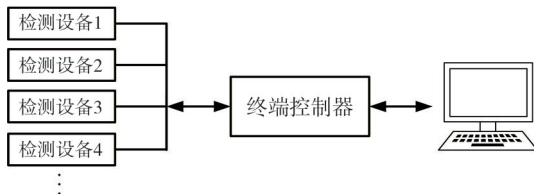


图4 监控终端示意图

Fig. 4 Schematic diagram of monitoring terminal

3.1 终端控制器模块

终端控制器能够有效地管理数台检测装置并将RS485通信协议转换为USB通信协议,确保不同接口标准的设备之间能够进行数据传输,实现检测装置与计算机终端的高效连接。

终端控制器包括单片机、USB转串口芯片、RS485驱动器以及相关外部电路,其中单片机仍沿用PIC16F887。计算机通过终端控制器将指令发送到各检测装置,实现对检测装置的编号、工作状态的查询和检测以及定标数据的写入。同时,检测装置通过终端控制器将采集的气体浓度数据发送至计

算机,以供远程存储、绘图显示以及报警处置。

3.1.1 USB转串口芯片

USB转串口芯片负责将USB信号转换为串口信号(TTL/CMOS电平),以便与RS485驱动器进行通信。其支持全速USB设备接口,兼容USB V2.0标准,并可以仿真标准串口,用于升级原串口外围设备或增加额外串口。本系统选用FDTI公司的FT232R转串口芯片,其电路图如图5所示。

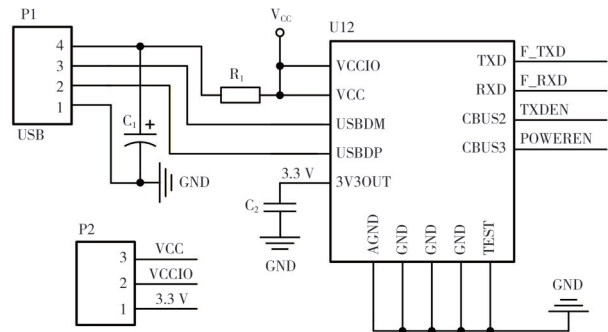


图5 USB转串口电路图

Fig. 5 USB to serial port circuit diagram

3.1.2 RS485驱动器

RS485驱动器是电路中的核心组件之一,由发送器和接收器两部分组成,分别负责信号的转换和还原。当发送器接收到TTL电平信号时,通过内部驱动电路将信号转换为RS485差分信号。这个过程中,TTL电平信号被放大,并分为两路互补信号,通过A线和B线进行传输。接收器接收到A线和B线的差分信号后,将其进行比较,确定信号的电平状态。最终,接收器将差分信号还原为TTL电平信号,输出接收到的数据。

总线驱动器沿用2.6节介绍的驱动器,该总线驱动器具有差分信号传输能力,能够有效抵抗电磁干扰,提高信号的完整性。MAX3485E电路图如图6所示。

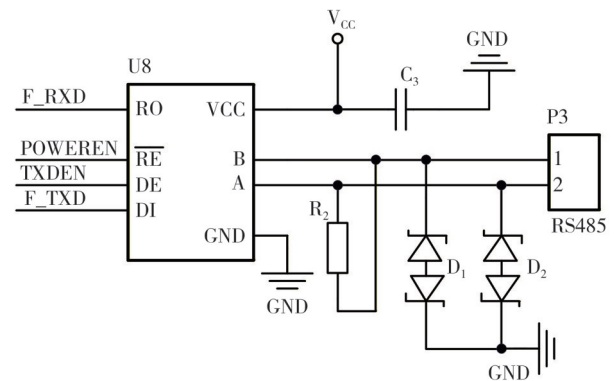


图6 RS485驱动器电路图

Fig. 6 RS485 driver circuit diagram

3.2 计算机软件设计

计算机软件配合检测系统完成初始化、状态查询、参数编程、启动/退出采集、灵敏度标定、超限报警以及数据上传等功能。软件部分由 Qt 进行设计完成,其设计流程图如图 7 所示。

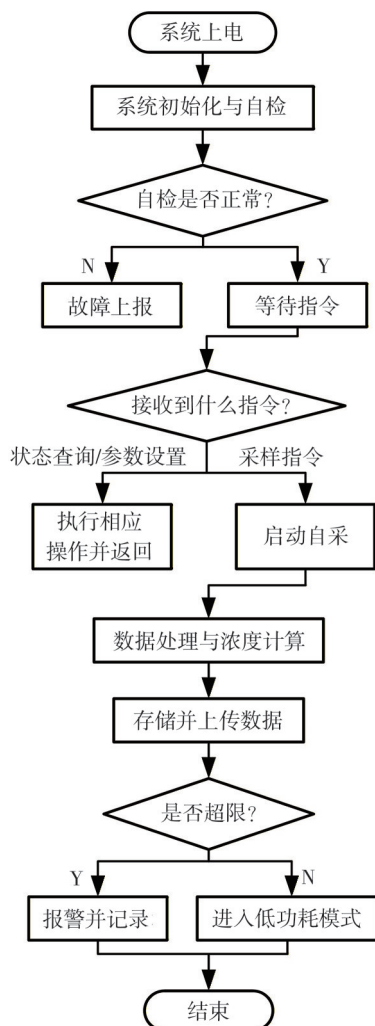


图 7 上位机软件程序设计流程图

Fig. 7 Flowchart of the upper-level machine software program design

本系统将软件界面共分为三个部分,分别为浓度采集界面、参数设置界面以及线性标定界面。

浓度采集界面如图 8 所示,主要用于控制检测装置的工作状态,显示气体浓度检测结果。该界面主要由三大区域构成:设备选择区、曲线绘制区以及功能选择区。

参数设置界面主要用于查询、显示检测装置的状态及设置参数。包括设备 ID 写入/读出区、定标数据写入/读取区、状态读取区、初始化区以及报警阈值设定区。

灵敏度标定界面主要用于检测装置的标定实

验。由功能区、绘图区以及结果显示区组成。

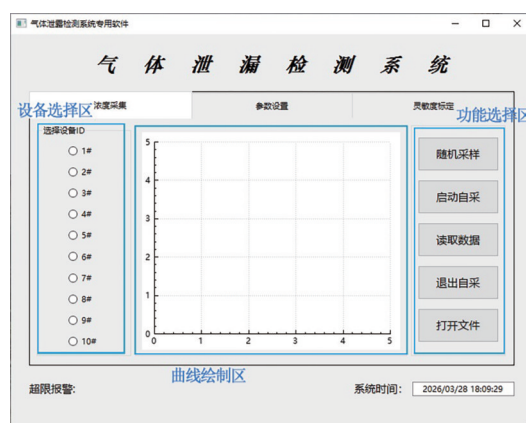


图 8 上位机浓度采集界面

Fig. 8 Upper computer concentration collection interface

4 系统功能验证

为了验证系统的整体功能,在FAE燃料的操作车间建立全域易燃易爆气体检测系统,进行实时的气体泄漏检测。如图 9 所示,在整个生产线按照工艺流程分为存储区、计量区、混合区和浇注区,各区域至少布设 1 个检测节点,节点通过总线型拓扑结构接入同一 RS485 主干,总线最终汇聚至位于监控室的监控终端。构成分布式检测的系统布局。总线电缆选用特性阻抗 $120\ \Omega$ 的双绞屏蔽电缆,屏蔽层在监控终端单点接地,以增强抗共模干扰能力。系统上电且确认各节点通信正常后,测试人员撤离至远程操作端,通过上位机软件进行初始化和启动自动采样等操作,实时检测采集数据。

本次试验测试时长为 26 h,报警阈值设置为 10×10^{-6} ,试验过程中可随时通过上位机软件读取测试数据。测试结束后,在监控终端读取气体泄漏检测 $c-t$ 曲线,如下图 10 所示。

图 10 中横坐标 0 代表 2025 年 6 月 23 日上午 8:00,由于系统检测周期为 15 min,故每采集一次横坐标值增加 15 min。本系统记录了自 2025 年 6 月 23 日 8:00 至 6 月 24 日 10:00 的气体体积分数的变化,可以看出体积分数主要分布在 $0 \sim 5 \times 10^{-6}$ 之间。其中,高体积分数时段集中在白天作业阶段,自 8:30 开始体积分数逐渐升高,且在横坐标 450 min 处即 6 月 23 日下午 15:30 达到峰值 5×10^{-6} ,而夜间(横坐标 270~360 即 12:30 至 14:00)和夜间(横坐标 630~1440 即 18:30 至次日 8:00)体积分数基本维持在 0×10^{-6} 水平。与夜间自然背景体积分数相比,白天作业阶段气体体积分数存在明显上升,说明系统能够精准识

别生产活动引起的微弱体积分数波动,具有较好的检测灵敏度。

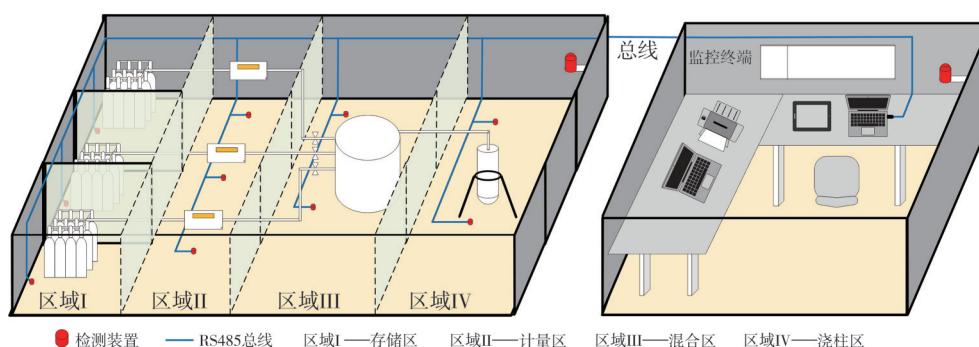


图9 检测系统试验现场示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the test site for the detection system

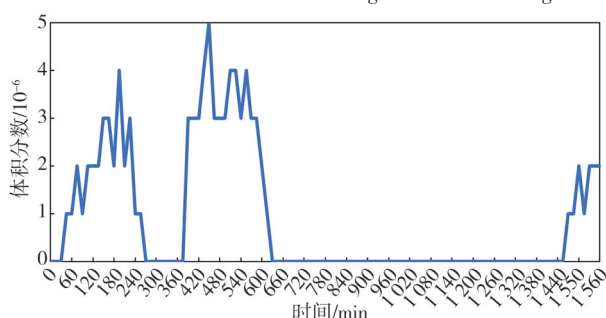


图10 气体泄漏检测 $c-t$ 曲线图

Fig. 10 Gas leakage detection $c-t$ curve

本次试验整体气体泄漏浓度较低,属于操作过程中的正常现象。试验全程气体泄漏浓度未达到报警阈值,未造成安全隐患。数据分析显示,气体浓度变化呈现明显的昼夜规律,与车间正常工作时间高度吻合,符合客观规律,表明系统在现场条件下具有较高的测量稳定性和传输可靠性;即使在低浓度背景下,系统仍能够准确分辨微量气体浓度变化,从而验证了其在云爆剂操作车间早期泄漏检测中的适用性。

5 结论

本文设计并实现了一套基于RS485总线的分布式气体泄漏检测系统,用于检测FAE燃料操作过程中的易燃易爆气体浓度。系统高效集成了数据采集与调理、单片机控制、总线驱动及电源管理等多个模块,结合分布式架构和差分信号传输技术,实现了高灵敏度、低延迟的数据采集与可靠存储。现场试验表明,系统能够稳定完成每15 min一次的浓度采集与传输。气体体积分数主要分布在 $0\sim 5\times 10^{-6}$ 范围内,其昼夜波动规律与生产作业时间高度吻合。试验全程未触发报警阈值,表明当前操作环境安全可控。本系统可实现

对FAE操作车间无人值守状态下的全天候、实时气体浓度检测,具有较好的工程应用价值。不过,当前系统主要面向单类挥发性有机气体的泄漏检测,多气体组分辨能力仍有待增强,后续可进一步围绕传感器阵列融合、特征识别算法以及低功耗节点设计开展研究,以提升系统的智能化水平与长期部署能力。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 刘鹏. 单兵火箭云爆弹弹道环境与引信动态特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [2] 吴力力, 丁玉奎, 甄建伟, 等. 云爆剂泄漏挥发原因分析[J]. 军械工程学院学报, 2017, 29(1): 28-31.
WU Lili, DING Yukui, ZHEN Jianwei, et al. Analysis of the reasons for FAE leakage and volatilization [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2017, 29(1): 28-31. (in Chinese)
- [3] 陈平. 面向毒害气体的多传感器系统设计[D]. 烟台: 山东工商学院, 2019.
- [4] 王云龙. 基于神经网络方法的工业现场VOCs气体检测系统设计与实现[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [5] 王彪, 连厚泉, 俞泳波, 等. 采用BP神经网络补偿的激光气体检测系统研制[J]. 激光杂志, 2022, 43(8): 19-23.
WANG Biao, LIAN Houquan, YU Yongbo, et al. Development of a laser gas detection system with BP neural network compensation [J]. Laser Journal, 2022, 43(8): 19-23. (in Chinese)
- [6] 董小虎, 王婧娜, 刘志伟. 云爆弹内硝酸异丙酯气体快速检测[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(9):

- 241-245.
- DONG Xiaohu, WANG Jingna, LIU Zhiwei. Rapid detection of isopropyl nitrate gas in fuel air explosive projectile [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(9): 241-245. (in Chinese)
- [7] 李二赛. 基于电化学原理的有害气体检测系统设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [8] 夏飞, 樊爱宛, 宋怡瑶. 基于 Arduino 的易爆气体智能检测系统[J]. 物联网技术, 2025, 15(7): 27-31.
- [9] O'BRIEN C W, SALAMY H, MIN C H. Design of a wireless cyber-physical system for gas leak detection with LoRa [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(14): 27998-28010.
- [10] 钱建康. 工业无线现场总线在石化安全监测的应用研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- [11] 李联宁. 基于嗅觉网络传输的重症疾病诊断机制与算法研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(S1): 128-133.
- LI Lianning. Study of severe disease diagnosis mechanism and algorithm of olfactory based on network transmission[J]. Computer Science, 2015, 42 (S1): 128-133. (in Chinese)
- [12] 张建海, 白振光, 韩志强, 等. 基于PID光离子传感器的VOC无线监控系统研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(1): 40-42.
- ZHANG Jianhai, BAI Zhenguang, HAN Zhiqiang, et al. Research on VOC wireless monitoring and controlling system based on PID sensor [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(1): 40-42. (in Chinese)
- [13] 王鸿建. 基于PID原理的VOC气体检测仪设计[J]. 电子世界, 2017(13): 176.
- [14] ZHOU Q, ZHANG S X, ZHANG X, et al. Development of a novel micro photoionization detector for rapid volatile organic compounds measurement [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2018, 2018: 5651315.
- [15] 陈希. 二阶有源低通滤波器设计研究[J]. 信息通信, 2018(12): 3-5.