

基于 ZigBee 技术的推进剂泄漏监测 报警系统的设计与实现

郝龙¹ 徐光¹ 赵全¹ 韩卫济¹ 马德常²

(1.北京航天试验技术研究所 北京 100074; 2.北京航天凯恩化工科技有限公司 北京 100074)

摘要: 针对推进剂泄漏的严重危害性,提出一种以CC2530微控制器为核心,基于ZigBee技术的推进剂泄漏无线监测报警系统。系统主要包括无线推进剂泄漏监测气体传感器、双模监测报警主机和总控计算机。传感器与报警主机之间通过ZigBee无线技术进行信号传递,并通过以太网通信将报警主机采集的数据传送到监控中心的总控计算机上。试验结果表明,系统无线传输可靠,对推进剂的监测误差小于3%。该系统实现了推进剂泄漏的无线监测,极大降低了系统的安装布置时间,具有很强的机动性,不但实现了固定模式的推进剂泄漏监测,还实现了机动模式下的泄漏监测。

关键词: 推进剂泄漏;CC2530;ZigBee;无线监测;气体传感器

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

Design and application of propellant leakage monitoring alarm system based on ZigBee wireless technology

Hao Long¹ Xu Guang¹ Zhao Quan¹ Han Weiji¹ Ma Dechang²

(1. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China;

2. Beijing Aerospace Kaien Chemical Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract: In view of the serious harm of propellant leakage, a monitoring alarm system for propellant leakage based on CC2530 microcontroller and ZigBee wireless technology is proposed in this paper. The system mainly consists of wireless propellant leakage monitoring gas sensor, dual mode monitoring alarm host and master computer. The sensor and the alarm host transmit the signal through the ZigBee wireless technology. The alarm host and the master computer in the monitoring room transmit the data collected by the alarm host through Ethernet. The experimental results show that the wireless transmission of the system is reliable, and the monitoring error of propellant is less than 3%. The system realizes the wireless monitoring of propellant leakage, greatly reduces the installation time of the system, and has a strong mobility, not only realizes the fixed mode propellant leakage monitoring, but also realizes the leakage monitoring under the maneuver mode.

Keywords: propellant gas leakage; CC2530; ZigBee; wireless monitoring; gas sensor

0 引言

在航天军工领域,液体推进剂挥发气体都是极其危险的化学气体^[1]。在存储、运输和使用过程中如果不能及时发现泄漏,并采取有效的应急处置措施,将会造成极其严重的后果和重大的损失。因此推进剂泄漏监测技术在推进剂的贮存和使用中是极其重要的^[2]。

传统的推进剂泄漏监测报警系统中各设备采用有线连接方式进行信号传输,布线繁琐,扩展性和可移植性不

高^[3]。近年来,随着新型无线通信的发展,传感器技术与无线通信技术结合的越来越紧密,各种基于无线技术的传感器被研发出来,气体监测领域也不例外。传感器领域常见的无线通信技术有ZigBee、LoRa、NB-IoT、蓝牙等。相比其他无线通信技术,ZigBee作为一种短距离无线通信网络技术,凭借其低成本、低功耗的优势,成为无线传感器网络中主要的通信协议之一^[4]。本文基于ZigBee技术,设计一套无线推进剂泄漏监测报警系统,系统可实现固定目标和机动目标的推进剂泄漏监测,一旦发生泄漏,系统可以及时发

出声光报警信号,提示相关人员及时采取必要的应急措施,最大程度地消除恶性事故发生的风[5-6]。

1 系统总体方案设计

本系统主要由无线推进剂泄漏监测气体传感器、双模监测报警主机和总控计算机组成。无线推进剂泄漏监测气体传感器安装在监测目标的待测位置,用于监测推进剂气体浓度;双模监测报警主机可通过固定支架安装在厂房内,也可手持使用,具有语音报警、推进剂气体浓度显示、ZigBee 和以太网通信等功能;总控计算机布置在监控中心,便于值班人员查看监测状态。系统结构原理如图 1 所示。

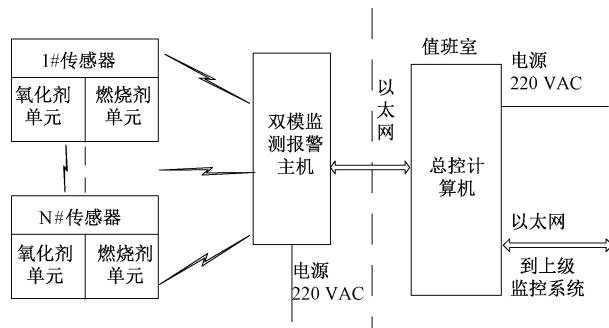


图 1 系统结构原理

每个传感器包含监测氧化剂和燃烧剂气体检测单元,由内置可充电锂电池供电。气体检测单元与待测气体发生反应,输出与浓度成正比的微弱电信号,经处理电路转换成电压信号后被 AD 采集,然后数据处理单元对采集到的数据进行计算等处理,最后由无线发射单元将信号发出。无线发射单元发送的数据包括传感器位置、泄漏气体种类、浓度信息、传感器状态信息和电池状态信息等。

监测报警主机具有无线收发功能,可与多个传感器进行组网,进行信息传递,并对传感器发来的数据进行计算、处理,并在主机屏幕上实时显示监测信息。主机具有以太网接口,通过网线接入局域网与总控计算机进行数据传输。主机发送监测数据给计算机,并接收计算机发送的控制命令。总控计算机的监控软件可显示所有传感器组合的监测信息,并对浓度信号进行数值显示和图形化显示,具有数据存档功能,并可根据需要将监测数据进一步上传至上级监控系统。

系统分为固定工作模式和机动工作模式。固定工作模式时,双模监测报警主机通过固定支架安装在厂房内,由外部 220 V AC 供电,通过无线接收单元接收传感器的信号,当任意 1 种气体浓度大于 3 mg/L 时,触发初级报警,主机发出初级报警语音;当任意传感器 2 种气体浓度均大于 20 mg/L 时,触发高级报警,主机发出高级报警语音。主机实时显示每个位置 2 种气体的浓度值、报警信息及其他信息。发生推进剂泄漏报警时,突出显示报警浓度、位置和气

体种类。另外,主机还能对电池状态、传感器状态进行显示。同时,通过以太网将所有信息传输到值班室的总控计算机。

机动工作模式时,系统不含总控计算机,双模监测报警主机通过内置电池供电,主机由操作人员手持携带,或固定在驾驶室中的专用车载支架上使用。

2 系统设计

系统设计主要包括无线推进剂泄漏监测传感器设计、双模监测报警主机设计和软件设计 3 部分。

2.1 无线推进剂泄漏监测气体传感器设计

无线推进剂泄漏监测气体传感器主要由壳体、燃烧剂气敏单元、氧化剂气敏单元、数据处理单元、信号调理单元、无线收发单元、电源模块、可充电锂电池、密封件、连接件等组成。传感器原理如图 2 所示。

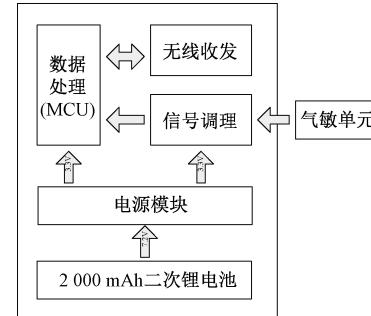


图 2 无线推进剂泄漏监测气体传感器原理框图

1) 数据处理和无线收发单元设计

数据处理和无线收发单元主要由微控制器 CC2530 和外围电路实现^[7]。传感器无线模块结构如图 3 所示。CC2530 是用于 IEEE 802.15.4、ZigBee 和 RF4CE 应用的一个真正的片上系统(SOC)解决方案。以非常低的总材料成本建立强大的网络节点,CC2530 结合领先的 2.4 GHz 频段 RF 收发器优良性能,业界标准的增强型 8051 单片机内核,系统内可编程 8 KB RAM,256 KB 的闪存。本设计选用 CC2530F256 微控制器进行设计。数据处理和无线收发单元通过 CC2530 微处理器和内置程序实现信号的 AD 转换、滤波、数据计算、无线收发控制功能^[8]。

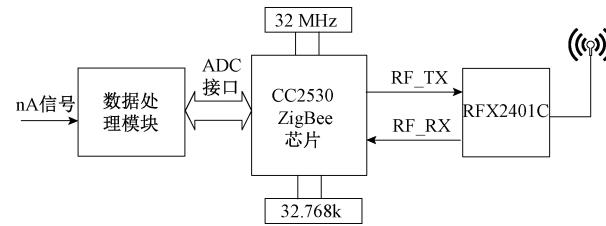


图 3 传感器无线模块结构

2) 信号调理单元设计

气敏单元产生的纳安到微安级别的电流信号,须经信

号调理单元转换成与气体浓度成线性关系的电压信号,才能被微控制器 CC2530 内置的 ADC 采集。信号调理单元主要由放大器电路和滤波电路组成^[9]。放大器需选用具有低功耗、高增益、高输入电阻、低失调和高共模抑制比等特性的芯片,本文选用 AD8642 构成运算放大电路,其输入偏置电流最大仅为 1 pA。轨对轨输出,单电源供电,低输出阻抗^[10]。信号调理单元电路设计如图 4 所示。

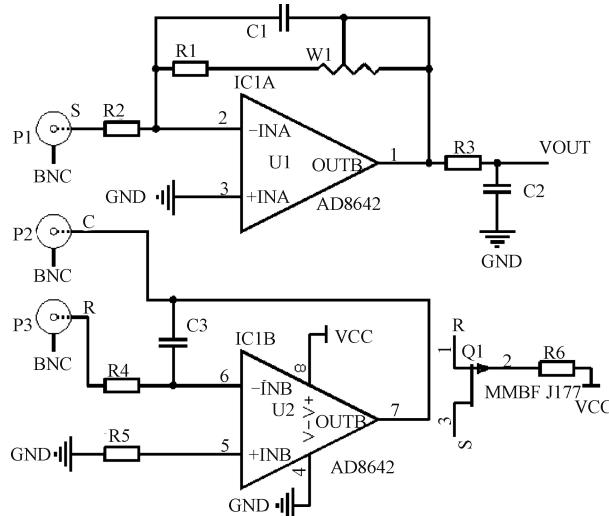


图 4 信号调理单元

3) 工作模式设计

由于传感器采用可充电锂电池供电,电池容量为 2 Ah,为了增加电池的供电时间,避免频繁更换电池造成的麻烦,传感器组合采用周期监测和实时监测两种模式。其中,周期工作模式为正常工作模式,实时监测模式为突发工作模式,只有监测到存在泄漏时,才从周期工作模式转换到实时监测模式。实时监测模式指传感器各个功能模块一直保持供电状态,实时监测发送传感器数据^[11]。

周期监测工作模式设计如下:设每个周期为 T ,工作时间为 T_{work} ,休眠时间为 T_{sleep} ,则在每个周期内,传感器组合在 T_{sleep} 时间内,信号调理单元处于断电状态,数据处理单元、无线收发单元处于休眠状态;在 T_{work} 时间段内,首先信号调理电路恢复供电,对敏感单元发出的微弱电信号进行调理,然后数据处理单元和无线收发单元恢复至工作状态,对进行数据处理后信号用无线收发单元发射出去。如图 6 所示,当在 T_{work} 时段内的 t_1 时刻监测到气体泄漏,传感器进入实时监测模式,直到泄漏解除的 t_2 时刻重新进入周期工作模式。

周期监测模式时序图如图 5 所示,周期监测模式及实时监测模式时序图如图 6 所示。在周期工作模式下,考虑电池损耗,按照 1 500 mA 计算,表 1 所示列出几种典型值下计算出的电池供电时长。

本项目选择 $T = 5 \text{ min}$, $T_{work} = 20 \text{ s}$ 作为常规工作模

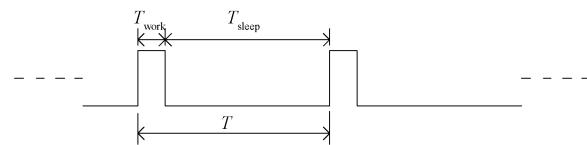


图 5 周期监测模式时序图

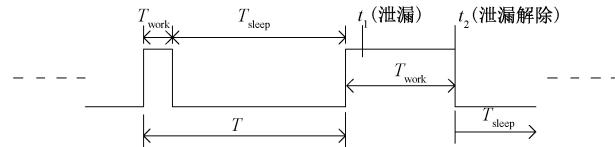


图 6 周期监测模式及实时监测模式时序图

表 1 典型值下的电池供电时长

序号	周期设置	电池供电时长
1	$T = 5 \text{ min}, T_{work} = 20 \text{ s}$	约 4 月
2	$T = 15 \text{ min}, T_{work} = 20 \text{ s}$	约 12 月
3	$T = 30 \text{ min}, T_{work} = 20 \text{ s}$	约 24 月
4	实时监测	约 30 h

式,一旦监测到发生泄漏后自动转为实时监测模式。

2.2 双模监测报警主机设计

双模监测报警主机由定制的加固平板计算机实现,其内置基于 ZigBee 技术的无线收发模块,配套固定支架和车载支架,可固定在墙壁上使用,也可手持或车载使用。

1) 无线收发模块设计

设计的基于 ZigBee 技术的无线收发模块内置在加固平板计算机内部,用于接收传感器组合发来的加密数据,并通过 RS232 串口与加固平板计算机内部进行通信。电路设计选择 CC2530+RF2401 功率增益的方案,确保系统无线传输功能的健壮性,并增加通信距离^[12]。无线接收模块结构如图 7 所示。

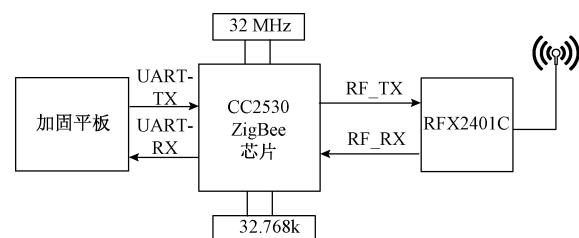


图 7 无线接收模块结构

2) 功能设计

通过专用支架的设计,主机可实现固定和机动两种使用模式。

通过硬件和软件设计,主机可显示大量的系统信息,包括传感器 ID、浓度数值、浓度曲线、电池电量、通信状态、泄漏报警状态、电池电量报警状态等;集成语音报警、消音、数

据存档、历史数据查询等功能；另外，通过以太网口和设计的软件接口与总控计算机进行通信。

2.3 软件设计

基于 CC2530 芯片开发的程序实现无线组网、浓度监测等功能，程序流程如图 8 所示。程序基于 IAR Embedded Workbench for 8051 软件平台，配合 Z-Stack 协议栈进行开发^[13]。

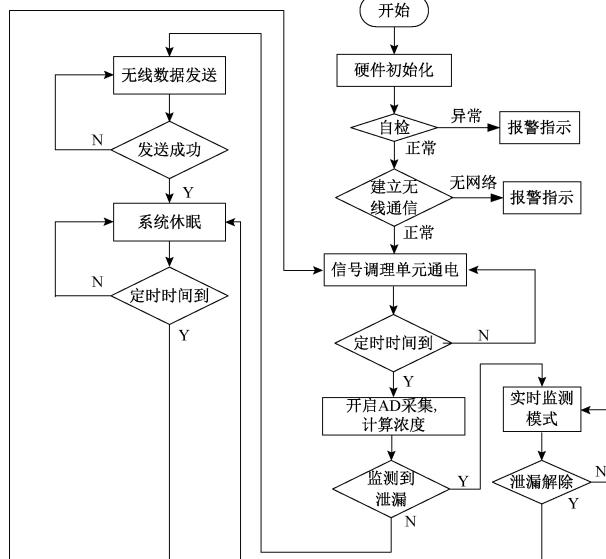


图 8 无线推进剂泄漏监测气体传感器程序流程

2) 双模监测报警主机和总控计算机软件设计

双模监测报警主机和总控计算机软件都是在微软 Windows 环境下基于 FameView 组态控制软件平台进行开发。两个软件组成、界面、功能大致一样，区别在于底层的通信接口。双模监测报警主机硬件上通过 RS232 串口与集成的无线收发模块进行通信^[14]，软件上采用自由口协议通信；通过以太网接口与总控计算机进行通信，软件采用 FameView 集成的以太网协议。

排除底层通信接口设计，双模监测报警主机和总控计算机软件结构如图 9 所示。

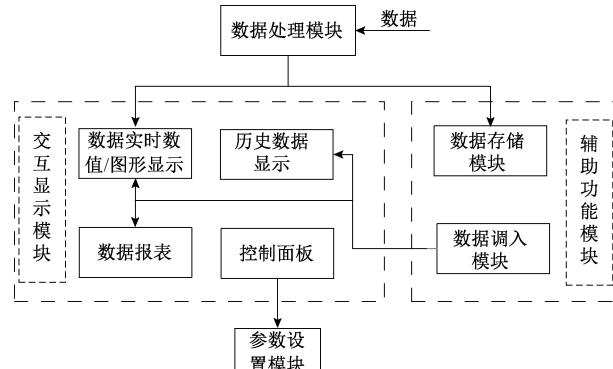


图 9 双模监测报警主机和总控计算机软件结构

3 试验结果

图 10 所示为系统实物，为了验证系统功能和参数，对系统进行燃烧剂和氧化剂标准气测试。传感器分别对两种推进剂气体的标准气进行敏感，经处理后的信号通过无线方式传输给双模监测报警主机和总控计算机，观察主机和总控计算机上的浓度数值，并与标准气浓度比较，验证系统的测量精度。通过将传感器与主机和总控计算机布置在不同的房间来验证信号传输的可靠性。



图 10 系统实物图

测试用标准气由国防标气配制系统进行配制。为模拟实际使用情况，传感器布置在 1 个房间内进行标气测试^[15]，双模监测报警主机和总控计算机布置在另一楼层的 1 个房间内，两个房间的直线距离超过 50 m，障碍物为 1 层楼板，2 层墙壁。在实际使用中，固定模式下，各部件间隔约为 30 m，机动模式下，传感器与主机之间的距离不超过 10 m，且无遮挡，故试验状态满足实际使用情况。试验数据如表 2 所示。

表 2 试验数据记录表

测试序号	标气类型	标气浓度 / mg/L	无线通讯状态	双模主机显示浓度 / mg/L	总控计算机显示浓度 / mg/L
1	燃烧剂	5.0	正常	5.1	5.1
	氧化剂	5.0	正常	4.9	4.9
2	燃烧剂	30.0	正常	30.2	30.2
	氧化剂	30.0	正常	30.0	30.0
3	燃烧剂	50.0	正常	48.8	48.8
	氧化剂	50.0	正常	50.1	50.1

对系统分别进行了 5、30 和 50 mg/L 的氧、燃推进剂气体的测试，试验结果表明无线通信可靠正常，传输距离满足使用条件，浓度监测误差小于 3%，满足监测要求，同时无线缆束缚，部件布置更加便捷快速。

4 结 论

伴随着国家对危险化学品生产和使用过程中环保和安全的重视，推进剂泄漏监测越来越受到各方的重视。本文针对传统推进剂泄漏监测报警系统需现场布线，安装难度大，周期长等缺点，设计了无线推进剂泄漏监测报警系统，

无线网络传感器与传统的有线传感器相比较,不仅能够大幅度减少成本投入,同时不会因为空间制约而影响信号传输。系统采用基于 ZigBee 技术的无线通信技术,经试验测试表明,系统信号传输可靠,浓度监测误差满足要求,系统实现了推进剂泄漏监测报警系统的快速布置,即可用于固定模式的推进剂泄漏监测,也可用于机动模式下的泄漏监测。本系统可广泛应用于推进剂生产、贮存、运输和使用的各个场景。后续研究可结合物联网技术,将监测数据上传至云服务器,实现在多个终端对泄漏进行监控。

参考文献

- [1] 丛继信,王力,张光友.液体推进剂职业中毒风险评价及防护对策研究[J].中国安全生产科学技术,2012,8(7):40-45.
- [2] 刘志娟,郭斌.肼类火箭推进剂气体检测技术[J].低温与特气,2007(2):37-42.
- [3] 王彦召,尚爱国,董振旗.基于 PID 技术的推进剂贮存环境监测控制系统[J].陕西工学院学报,2004(2):14-16.
- [4] 刘佳,王立新.基于 ZigBee 的无线气体监测系统的设计[J].自动化与仪器仪表,2011(2):44-45,49.
- [5] 王勇.基于 ZigBee 矿井监控系统设计[J].国外电子测量技术,2017,36(7):58-61.
- [6] 朱斌,唐勇,谭勇,等.基于 ZigBee 的工控网数据采集传输系统设计[J].化工自动化及仪表,2010,37(4):81-85.
- [7] 张冲,熊勇,房卫东,等.ZigBee 网络性能测试系统研
究[J].国外电子测量技术,2015,34(8):74-81.
- [8] 陈自刚.基于 CC2530 的煤矿气体监测终端设计[J].南阳理工学院学报,2016,8(6):1-4.
- [9] 王朋凯,杨文明.微弱直流电流放大电路的比较研究[J].电子测量技术,2018,41(11):45-50.
- [10] 王磊,秦光远,潘文祥,等.基于气体传感器阵列的轿厢内有害气体监测系统的设计[J].信息通信,2017(4):74-75.
- [11] 王春香,纪松波.采用 ZigBee 技术的温室环境监控系统设计[J].电子测量技术,2014,37(12):120-122,126.
- [12] 焦尚彬,宋丹,张青,等.基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿监测系统[J].电子测量与仪器学报,2013,27(5):436-442.
- [13] 郑争兵.面向有毒气体监测的无线传感器网络系统的实现[J].计算机与应用化学,2015,32(5):631-633.
- [14] 温良,叶锦娇,王红尧,等.新一代煤矿井下监控系统研制[J].电子设计工程,2012,20(16):109-112.
- [15] 李西文.受限空间的气体监测[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(9):28-29.

作者简介

郝龙,硕士、工程师,主要研究方向为检测技术及自动化装置等。

E-mail:haolong19861986@126.com

徐光,硕士、工程师,主要研究方向为检测技术及自动化装置等。

E-mail:bright-boy@163.com