

文章编号: 2095—0411 (2012) 02—0058—06

# 基于 ZigBee 技术的石化领域高防爆无线监测系统<sup>\*</sup>

潘巧灵<sup>1</sup>, 丁建宁<sup>1,2</sup>, 王君雯<sup>1</sup>, 袁宁一<sup>1,2</sup>

(1. 常州大学 低维材料与微纳器件中心, 江苏 常州 213164; 2. 江苏省太阳能电池材料与技术重点实验室, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 石化领域频频发生火灾和爆炸事故, 但是现有的监控系统受到环境、成本等各种客观条件的限制, 不能很好地满足石化领域的监控要求。而基于 ZigBee 技术的高防爆无线传感器网络主要采用微控制器 MSP430F149 和 CC2420 无线通信芯片相结合的方式进行实时采集数据, 当采集到的温度、压力或者可燃气体浓度值超过设定的阈值时, 立即发送报警信息, 并实时进行智能防爆。点对点跟组网通信测试结果表明通信距离和丢包率均能很好地满足石化领域的监控要求, 而数据采集结果也很好地说明了系统运行的稳定准确性。

**关键词:** ZigBee; 高防爆; 无线传感器网络; MSP430F149; CC2420

**中图分类号:** TP 212

**文献标识码:** A

## High Explosion—Proof System of Wireless Sensor Network Based on ZigBee in Petrochemical Field

PAN Qiao—ling<sup>1</sup>, DING Jian—ning<sup>1,2</sup>, WANG Jun—wen<sup>1</sup>, YUAN Ning—yi<sup>1,2</sup>

(1. Center for Low—Dimensional Materials, Micro—Nano Devices and System, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for Solar Cell Materials and Technology, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** In recent years, fires and explosions in the petrochemical field occur frequently. Due to a variety of objective constraints such as environment and cost, the existing monitoring systems cannot meet the petrochemical field's demand. The high explosion—proof system of wireless sensor network based on ZigBee technology, which uses the combination design of the microprocessor of MSP430F149 and the RF chip of CC2420, can collect the data in real—time. If the collected data which includes temperature, pressure or flammable gas chroma exceed the setted threshold, the system can send the alarm information to the staffs immediately and realize the intelligent explosion—proof in the meantime. The test results of point—to—point communication and group network communication show that the communication distance and packet loss can well meet the requirements in petrochemical field. Meanwhile, the acquisition data also indicate that the system runs stably and accurately.

**Key words:** ZigBee; high explosion—proof; wireless sensor network; MSP430F149; CC2420

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012—03—15

基金项目: 江苏省科技项目基金 (BE2009028, BY2010122)

作者简介: 潘巧灵 (1987—), 女, 浙江三门人, 硕士生; 通讯联系人: 丁建宁。

近年来,石化领域频频发生火灾和爆炸事故,这不但造成了大量的财产损失,还对社会构成了很大的安全隐患。而石化领域现有的监控系统主要包括基于摄像头的视频监控系统<sup>[1]</sup>;基于传感器、总线或以太网的监测系统<sup>[2]</sup>;基于传感器的无线监测、报警系统<sup>[3,4]</sup>;以及近年来新兴的数字油田系统<sup>[5]</sup>。但是石化的勘察场地和运输管道一般分布较偏僻,范围广,且环境比较恶劣。上述的几种监控系统受到各种客观条件的限制,不能很好地满足石化行业的生产现状。

随着计算机、网络通信、智能计算、传感器、嵌入式系统、微电子等技术的快速发展,一门涉及多学科交叉的新兴学科在世界范围内出现,掀起了一股无线传感器网络的研究热潮<sup>[6]</sup>。无线传感器网络能够实时感知和监测各种环境区域的信息,并对这些采集到的信息进行分析处理,对各行各业有着巨大的科学意义和应用前景。所以,针对石化领域的特殊应用环境,一种以 ZigBee 技术为核心通信方式的高防爆无线传感器网络的节点设计方案被提出,当系统采集到的数据超过任一设定的阈值时,

立即发送报警信息,并实时进行联动智能防爆。

## 1 总体监控系统

石化领域最主要的应用就是采油系统跟原油的输送,一般的采油系统包括采油井、单井输油管道、计量站、联合站和外输管道,原油利用单井输油管道输送到计量站,经过汇聚后再输送到联合站进行脱水处理后外输给客户<sup>[7]</sup>。因此在采油井及输油管道附近安置传感器节点,用温度传感器和压力传感器实时采集当前管道的温度和压力值,而气敏传感器则用来监测空气中可燃混合气体的体积分数。计量站相当于一个中转站,通常会安排值班人员,因此在此的节点可以作为汇聚节点,这样与周遭的传感器节点形成一个星型网络拓扑结构。传感器节点可以把采集到的信息发送到汇聚节点,汇聚节点把收到的信息经过汇总处理后,发送给设置在联合站内的管理节点,而管理节点内的信息可以通过 Internet 或者卫星发送给各管理工作站<sup>[8]</sup>。系统的总体结构图如图 1 所示。

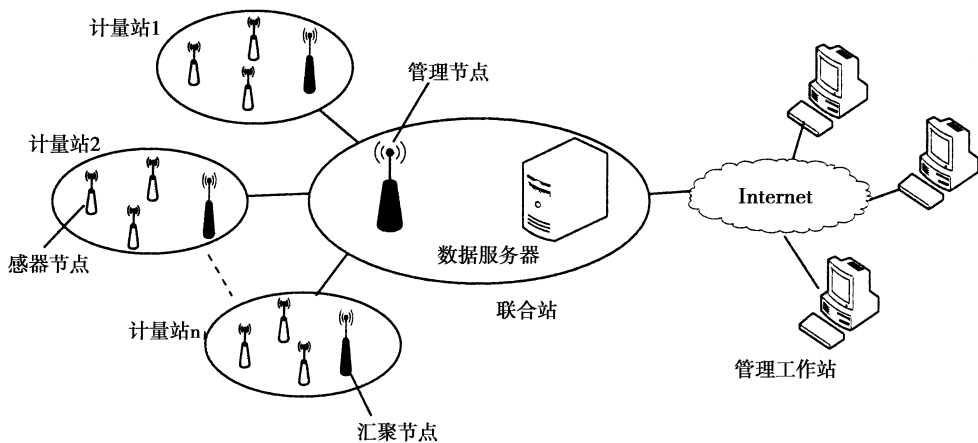


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

### 1.1 硬件设计

#### 1.1.1 方案选择

在无线传感器网络的设计过程中首要考虑的问题就是能耗。因此,各模块所采用的器件在选型时应遵循低功耗、低成本、微型化的原则。而现有市场上常用的硬件设计方案主要有:① AVR 单片机 Atmega 128L 和 CC2520 射频芯片;② Freescale 的 HCS08 和通信模块 MC 13192;③ CC2530 片上系统;④ 16 位超低功耗单片机 MSP430 系列和射频芯片 CC2420。

方案 1 功耗低,但是由于是两个公司的芯片,所以没有很好的现成协议栈支持;方案 2 技术支持好,但是处理器芯片应用不是很广泛;方案 3 是一个集成的 Soc 系统,体积小,成本低,适合于数据处理简单的场合;而方案 4 不但可以运行数据较复杂的算法,而且技术支持和功耗方面都有一定的优势。因此, MSP430F 149 和 CC2420 相结合的设计方案无疑是不二的选择。

#### 1.1.2 数据处理模块

MSP430F149<sup>[9]</sup>是 TI 公司生产的 16 位超低功耗的混合信号控制器,采用 1.8—3.6V 供电,

7mm×7mm QFP64 封装, 有 5 种低功耗模式 (LPM0—LPM4), 在 2.2V 供电电压、1MHz 的时钟条件下, 工作电流为 280μA; 掉电模式下 (RAM 数据保持) 最低功耗为 0.1μA; 待机模式下最低功耗为 0.8μA。此外, 还有丰富的 I/O 接口和强大的处理能力, 从待机到唤醒模式响应时间不超过 6μs。能方便高效地进行在线仿真和编程。

1.1.3 无线通信模块

CC2420<sup>[10]</sup> 是 Chipcon 公司推出的首款符合 2.4GHz, IEEE802.15.4 标准的无线收发器芯片, 它是基于 Chipcon 公司的 SmartRF03 技术, 以 0.18μm 的 CMOS 工艺制成, 集成度高。CC2420 外围电路非常简单, 采用 7mm×7mm QLP48 封装, 供电电压为 2.1—3.6V, 性能稳定且功耗超低 (RX: 19.7mA; TX: 17.4mA), 可实现多点对多点的快速组网。

CC2420 通过 SPI 总线设置不同的工作模式, 来进行读/写缓存数据等操作。SPI 总线包括 SCLK, SI, SO 和 CSn 4 个引脚, 其中 SCLK 是时钟信号, 提供脉冲信号, 其值可高达 10MHz; SI 和 SO 引脚基于 SCLK 时钟信号进行数据传输; CSn 是使能信号, 低电平有效, 由主设备控制。CC2420 通过 SFD、FIFO、FIFOP 和 CCA 4 个引脚向微控制器 MSP430F149 传输数据收发的状态。当开始传输数据时, SFD 引脚被置为高电平, 直到数据传输结束。图 2 为 CC2420 与微控制器 MSP430F149 的接口连接。

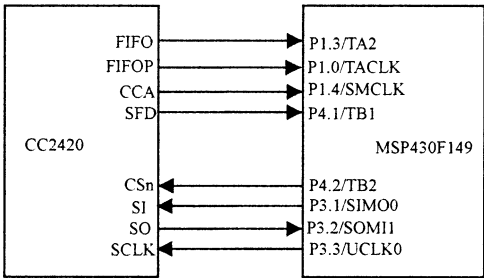


图 2 CC2420 与 MSP430F149 的接口连接

Fig. 2 The connector between CC2420 and MSP430F149

1.1.4 数据采集模块

随着传感器技术的快速发展, 各类传感器如温度、压力、气敏纷纷面世, 因此各种信息的采集也皆为可能。而在石化领域通常采用温度、压力和气敏传感器等。①温度传感器 DS18B20: 全数字温度传感器, 单总线数据通信, 低电压供电 (3.0—5.0V); 测温范围为 -55—125℃, 内置 EEPROM, 限温报警。②压力传感器 MS5534AP: 集

成了一个压阻式压力传感器和 ADC 接口 IC, 供电电压范围为 2.2—3.6V, 还提供了一个 16 位的压力和温度参数输出, 压力范围 30—110kPa, 温度范围 -40—60℃。③气敏传感器 MJC4/3.0L: 气体体积分数的监测范围在 1%—100% LEL 之间, 工作电压为 3.0V, 温度范围 0—+40℃, 湿度低于 95% RH (+25℃), 大气压力范围 80—116kPa。

1.1.5 声光报警模块

声光报警模块是整个系统中很重要的一个环节, 通过报警信息可以让工作人员及时对可能发生的灾害进行提前预防。报警的状态主要包括电池报警、温度阈值报警、压力阈值报警和气体阈值报警。系统主要利用蜂鸣器来实现声音报警, 用 LED 灯实现光信号报警, 报警电路如图 3 所示。

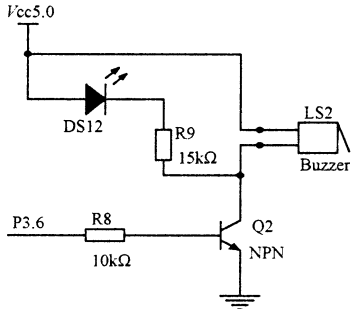


图 3 报警电路图

Fig. 3 The circuit of alarm

1.1.6 防爆模块

防爆模块用于在检测到有隐藏的爆炸危险时, 及时有效地做出相应的防爆措施。防爆措施主要是释放惰性气体来稀释可燃气体的浓度, 惰性气体为 100% 纯度的二氧化碳<sup>[11]</sup>, 在压力作用下以气态存储于惰气存储器内。惰性气体的加入, 可以有效降低可燃气体浓度, 缩小可燃气体的爆炸极限范围, 缓自动关闭安全阀, 同时打开电动阀门, 迅速释放大量的惰性气体, 以降低空气中混合气体的浓度, 在发生爆炸或火灾时可辅助灭火抑制爆炸的发生或使爆炸变为缓慢的燃烧。而且二氧化碳成本低, 常温下加压即可液化, 同时液化二氧化碳的过程中可以吸收大量环境热量, 防爆效果更明显。

惰气系统如图 4 所示, 主要包括前滤器、惰气压缩机、惰气冷却器、安全阀、惰气存储器和电动阀门, 前滤器与惰气压缩机相连, 惰气压缩机与惰气冷却器相连, 惰气冷却器有两个引出端, 一个引出端与安全阀相连, 另一个引出端与后滤器相连, 后滤器与惰气存储器相连, 电动阀门设置在惰气存

储器的排气口上，与外输管线相连<sup>[12]</sup>。惰气从惰气系统输入，经过前滤器输送到惰气压缩机进行增压，增压后的气体被储存在惰气储罐内。当控制中心通过远程控制打开电动阀门的时候，储罐内的惰气开始大量向外释放，来稀释空气中可燃气体的浓度，从而达到防爆抑爆的效果。

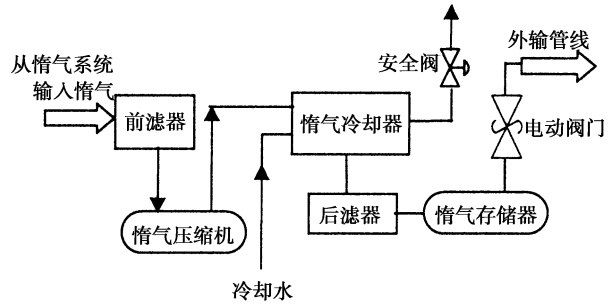


图 4 惰气系统图  
Fig. 4 Inert gas system

1.2 软件设计

为了让系统具有良好的扩展性和稳定性，软件采用模块化的设计思想，多个分程序模块组成整个防爆系统的软件模块，主要包括：传感器节点模块和汇聚节点模块。

1.2.1 传感器节点模块

传感器节点在初始化之后先在其通信范围内搜索是否存在网络，如果没有找到任何网络，则入网失败；反之，如果找到网络，则发送请求入网消息，并将自身的地址信息发送给汇聚节点。汇聚节点在接收到入网请求后，根据请求信息判断是否允许其加入网络。若允许加入，汇聚节点给传感器节点发送请求响应。传感器节点收到请求响应后，将获得管理节点分配给它的一个网络地址作为网络内的唯一身份标识，该节点成功加入网络。如果汇聚节点不允许该传感器节点加入，则该传感器节点可以寻找另外一个网络申请加入。图 5 为传感器节点的流程图。

1.2.2 汇聚节点模块

网关节点在上电后先检测是否有存在的网络，如果没有则建立新的 PAN 网络。然后开始搜索网络中是否有节点申请加入，如有允许加入并添加绑定表。然后汇聚节点开始通信，其通信过程主要分为两个方面：一是各传感器节点向上位机发送数据；另一个就是上位机向各传感器节点发送命令。汇聚节点在进行数据通信之前，需先判断当前数据包类型。如果是数据帧，则是传感器节点发送给

上位机的；如果是命令帧，则是上位机发送给各传感器节点的。不管是数据帧还是命令帧，汇聚节点都以收到 ACK 帧来确定当前的数据传输是否成功。汇聚节点的流程图如图 6 所示。

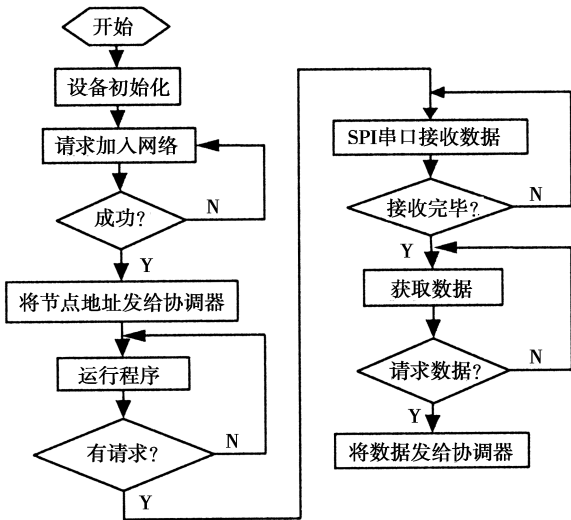


图 5 传感器节点流程图  
Fig. 5 The flow chart of sensor node

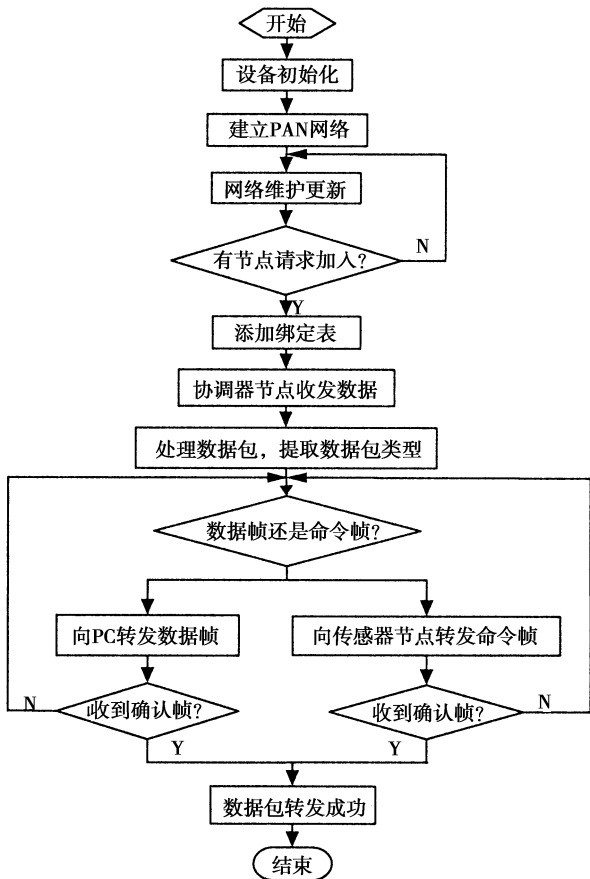


图 6 汇聚节点流程图  
Fig. 6 The flow chart of sink node



2 测试结果

无线通信测试主要采用 TI—Chipcon 公司提供的 SmartRF Studio 测试软件<sup>[13]</sup> 来对无线通信模块的通信距离、误码率以及组网稳定性等问题进行评估和功能测试。此外, 在实验室内模拟现场环境, 通过传感器节点采集各种数据来进行数据采集测试。

2.1 点对点测试

点对点通信测试主要测试两个节点之间的通信距离和误码率。首先放置两个节点, 一个是传感器节点, 通过上位机发送命令数据包; 另一个是汇聚节点, 接收数据包并发送汇聚节点地址给传感器节点。测试中两节点连续互发大小 (50B) 的数据包; 通信信道固定 (0x0B 信道), 节点发射功率为 -10dBm。传感器节点每次接收到汇聚节点返回的 ACK 帧后立刻进行下一次传输, 中间无延时。100ms 内没有收到汇聚节点返回的确认信息, 则认为此次传输超时, 立即进行发送下一个数据包。在传输过程中, 数据的发送模式被设定为无重发机制。表 1 为点对点测试的数据结果。

表 1 点对点通信测试

Table 1 The point-to-point communication test

序号	测试距离/m	测试条件	发包数	收包数	丢包率/%
1	20	无障碍物	18 824	18 824	0
2	20	有障碍物	17 381	17 381	0
3	100	无障碍物	19 838	18 726	5.6
4	100	有障碍物	18 232	16 267	10.7
5	200	无障碍物	17 221	13 205	23.3
6	200	有障碍物	18 013	10 831	39.9

从表格的数据中可以看出, 传感器节点跟汇聚节点之间可以进行很好的通信, 节点间的通信距离也能很好地满足石化领域的通信要求。由于节点通常部署在野外, 节点间的通信必然有一定的障碍物。从表中可以看出, 同距离有障碍物的丢包率略高于无障碍物的通信。随着通信距离的增大, 丢包率呈上升趋势。

2.2 组网通信测试

上位机给汇聚节点发送采集数据的命令, 汇聚节点以广播的形式发送给其网络区域内的所有传感器节点。传感器节点将采集到的监测数据通过多跳网络的方式传输给汇聚节点, 再通过串口上传到上位机, 并作数据分析。上位机发送命令间隔时间为 100ms, 如果 100ms 内没有收到数据, 则认为此

次传输超时, 发送下一个命令帧。在组网数据测试过程中, 数据采用了带重发机制的发送模式。组网测试数据如表 2 所示。

表 2 组网通信测试

Table 2 The group network communication test

序号	发送间隔/s	跳数	发包数	收包数	丢包率/%
1	1	2	9 872	9 870	0.01
2	1	3	10 282	10 278	0.04
3	1	4	12 314	12 295	0.15
4	20	2	9 123	9 122	0
5	20	3	9 827	9 824	0.02
6	20	4	12 028	12 020	0.07
7	50	2	8 923	8 923	0
8	50	3	9 622	9 621	0.01
9	50	4	11 093	11 090	0.03

测试结果表明, 发送时间间隔较短时, 丢包率随着跳数的增加而增加; 随着发送时间间隔的增大, 丢包率随跳数变化越来越缓慢。这主要是因为发送时间很短时, 网络数据传输在每个中继多跳都需要耗费时间和能量。当跳数越大, 导致数据传输失败的概率越大, 所需的时间也越多。而且在短时间通信中, 容易出现干扰现象, 重发机制作用不大。从表中可以看出, 发送时间间隔为 20s 时, 丢包率下降; 发送时间间隔为 50s 时, 丢包率几乎没有。对于用户来说, 选取合适的发送间隔时间, 再加上有效的重发机制, 可以满足大多数用户的需求。

2.3 数据采集测试

测试网络由 3 个传感器节点, 1 个汇聚节点和 1 个管理节点组成。每个节点分配的物理地址都是唯一, 其中传感器节点 1 的物理地址为 0x00124B000A77410, 传感器节点 2 的物理地址为 0x00124B000A77411, 传感器节点 3 的物理地址为 0x00124B000A77412, 汇聚节点 1 的物理地址为 0x00124B000A77440, 管理节点 1 的物理地址为 0x00124B000A77450。传感器节点被分别放置在实验室不同的位置, 主要用来采集室内的温度、大气压和可燃气体浓度值, 每隔 1 分钟采集一组数据, 采集完毕后通过 CSMA/CA 机制发送给汇聚节点; 汇聚节点负责接收传感器节点采集的数据, 当收到管理节点向其发送的轮询命令后把接收到的数据传送给管理节点; 管理节点每隔 10min 向汇聚节点发送轮询命令, 然后接收来自汇聚节点的数据, 并将其存入数据库中。

图 7 为传感器节点 1 采集的部分数据。从图 7

中可以看出，实验室内的大气压基本维持在 98KPa 左右，而温度和可燃气体体积分数基本没有变化。测试数据表明，传感器节点采集的温度、大气压和可燃气体体积分数符合实际情况，数据通信正常，符合设计要求。

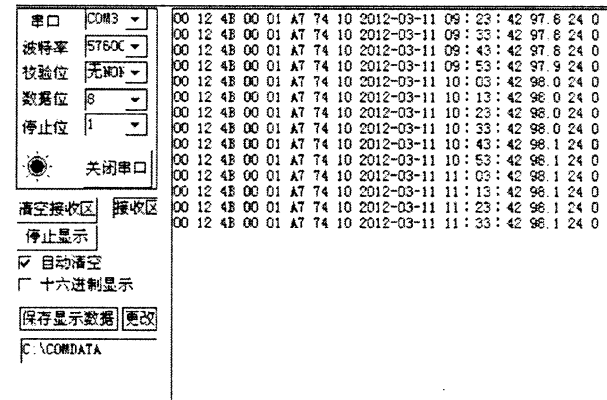


图 7 传感器节点 1 采集的部分数据

Fig. 7 The part acquisition data of sensor node 1

3 结 论

石化的勘采场地和运输管道一般分布较偏僻，范围广，且环境比较恶劣，一旦发生泄漏或者一些其他难以预料的失误时，很难及时进行维护。在 ZigBee 技术的基础上，一种基于微控制器 MSP430F149 和 CC2420 无线通信芯片相结合的无线传感器网络系统被提出，此系统主要在基础的无线监测基础上加入了声光报警模块跟防爆模块，一旦采集到的温度、压力或者气体浓度值超过系统设定的阈值，声光报警模块立即向工作人员发送声光报警信息，同时启动防爆模块释放惰性气体来抑制空气中可燃气体的浓度，从而能实现防爆抑爆的效果。因此，对石化领域频频出现的爆炸事故具有较强的应用价值。

参考文献：

[1] Wang Ying, Guo Xiao—Feng. Oilfield of video monitoring and alarm system based on DM 642 [J]. Informatics in Control, Automation and Robotics, LNEE, 2011, 132: 691—698.

[2] Luo Yu, Jiao Xiang—dong, Ji Wen—gang. Network communication of digital welding power source based on CAN—open [J]. Shanghai Jiaotong University, 2010, 44 (1): 62—65.

[3] Liu Jian, Qin Da—Li, Yu De—Jie. Intelligent condition monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14 (10): 2047—2051.

[4] 张善俊, 李利珍, 王松德. 无线遥控可燃气体泄漏报警系统的设计 [J]. 工业安全与环保, 2011, 37 (8): 8—11.

[5] Zhang Xian—wei, Zhang Jing. Research on digital oilfield resources sharing based on the grid technology [J]. Journal of Convergence Information Technology (JCIT), 2012, 7 (8): 211—219.

[6] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 4—5.

[7] 艾茂良. 基于无线传感器网络的采油与原油输送检测系统的研究与实现 [D]. 济南: 山东大学, 2007.

[8] Akyildiz I A, Sankarasubramaniam W Su Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38 (4): 393—422.

[9] 沈建华, 杨艳琴. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[10] Chipcon A S. SWRS041B CC2420 2.4GHz IEEE802.15.4/ZigBee—Ready RF Transceiver [S]. Oslo: Chipcon A S, 2004.

[11] Ma Li, Xiao Yang, Deng Jun, et al. Effect of CO<sub>2</sub> on explosion limits of flammable gases in goafs [J]. Mining Science and Technology (China), 2010, 20 (2): 193—197.

[12] Tolmasquim S T, Nieckele A O. Design and control of pig operations through pipelines [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2008, 62 (3—4): 102—110.

[13] Texas Instrument. SWRU070 SmartRF Studio User Manual Rev 6.13.1 [S]. Dallas: Texas Instrument, 2009.