

基于 ZigBee 技术的煤矿现场气体监测系统设计

智鹏辉 韩成浩

(吉林建筑大学电气与计算机学院)

摘要：地下煤矿现场工作环境恶劣，有毒及易燃气体的含量快速升高可能导致人员伤亡以及经济损失。因此，对井下重点区域的气体成分进行定时监测意义重大。本文设计了一种基于 ZigBee 地下无线传感器网络的监测系统，采集煤矿现场温湿度数据，以及有害气体包括甲烷、一氧化碳的气体含量数据。系统设计界面的设计基于 LabVIEW 程序，可对数据进行实时显示与阈值报警，历史数据将保存至 MySQL 数据库，以供后续数据分析和处理。

关键词：瓦斯监测；ZigBee；LabVIEW；无线网络；MySQL

0 引言

煤矿是我国长期的主要能源之一。在煤矿开采过程中由于诸如设备失灵、人员安全意识薄弱等原因，造成巨大损失。超过 10 人死亡的事故中，90% 的直接原因是瓦斯事故^[1]。我国仍有相当大的比例采用有线监测系统，其具有高稳定性、强抗干扰能力等优点，但在矿井掘进面推进时，不宜随着巷道的深入随时敷设，并且在采空区布置存在困难，可能造成监测盲区。本文根据井下煤矿现场的特殊环境，设计了一种基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿气体监测系统。

地下煤矿有害气体包括可能引起爆炸的瓦斯气体，以及爆炸后在巷道中扩散的有毒气体。瓦斯气体主要成分是烷烃，其中占比最高的是甲烷气体，其含量通常在瓦斯气体的 50% 到 90% 之间，根据煤层的类

型、成熟度、厚度、深度等因素而不同。国内学者对不同瓦斯体积浓度爆炸后的气体进行测定，初始甲烷浓度越高，爆炸后被释放的 CO 含量越高。因此将甲烷以及一氧化碳气体作为本系统主要监测的气体。

目前煤矿井下无线传感器网络较少使用 WiFi、蓝牙等高功耗无线网络，更多采用 LoRaWAN（远距离宽区域网络）、NB-IoT（窄带宽物联网）、ZigBee 等低功耗网络，ZigBee 是在满足 IEEE 802.15.4 标准之上建立低成本、低功耗的无线局域网，包括对网络层、应用程序支持层、应用层的技术规范^[2]。以上无线网络均可作为传感器网络。ZigBee 的分布式组网方式是其最大优点，相较于前两种传感器网络，更加适用于地下煤矿现场的实际情况。三种无线传输方式的比较如表 1 所示。

表 1 无线传输方式的比较

	LoRaWAN	NB-IoT	ZigBee
功耗	低	低	低
有效距离	20km	10km	100m
传输速率	50Kbit/s	250Kbit/s	250Kbit/s
传输介质	无线电	蜂窝移动	无线电
基站需求	是	是	否

1 系统总体结构

地下无线传感器网络采用树型拓扑结构，各节点气体信息发送至继电控制单片机，继电控制单片机将数据通过 CAN 总线定时发送至上位机^[3]。上位机采用 LabVIEW 软件对数据进行显示，并将历史数据保存至 MySQL 数据库。有害气体超标时，系统确认危险信息的位置，启动声光报警，提醒人员疏散与防护。并根据当前地下情况启动相应继电设备。系统的总体设计图如图 1 所示。

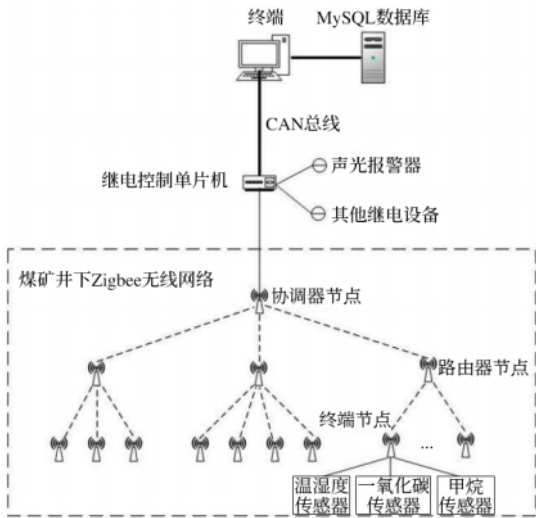


图 1 系统总体设计图

2 硬件设计

2.1 无线节点硬件设计

无线传感器网络是一种自组织的网络系统，能够协同感知、收集和处理环境信息，使得网络在环境干扰或节点故障的情况下仍可稳定运行。ZigBee 无线

网络设备根据功能可划分为路由器、协调器和终端节点，路由器提供路由功能，将数据转发至其他相邻节点^[4]。当某个节点失去连接时，附近的其他路由节点会返回数据并改变网络拓扑。协调器负责建立网络以及设备的管理任务等，且每个网络只能同时存在一个协调器。

ZigBee 网络具有一套用于感知周围节点失去连接并且重新建立拓扑的机制，节点通过心跳机制定期发送心跳信号感知周围节点的在线状态。当某节点失去连接，相邻节点将与父节点尝试建立连接。通过这种方式进行更新与重组，保证网络整体连通性。

为了保证网络的可扩展性，各节点的硬件和软件需严格统一，并在编译时划分为不同功能的模块，硬件包括微处理器、射频模块、供电模块和传感器模块。无线节点采用内部集成 8051 微控制器核心的 CC2530 芯片作为微处理器。传感器模块包括甲烷传感器 MQ4、一氧化碳传感器 MQ7 与温湿度传感器 DHT11。DHT11 为单线数字输出的温湿度复合传感器，3~5.5V 直流供电。MQ4 与 MQ7 是常见的半导体气敏传感器，其内部的气敏材料二氧化锡的电导率随着空气被测气体浓度增大而增大。根据内部辅助元件的不同，从而检测不同类型的气体，通过简单的转换电路模拟输出气体含量。图 2 由左至右分别是用于检测气体的 MQ4 与 MQ7 模块。



图 2 MQ4 (左) 与 MQ7 (右) 传感器模块

射频电路包括射频收发器、天线、滤波器、放大器、频率合成器等，其频段选择 16 个 2.4GHz 中的一个，传输速率为 250kbit/s。MQ4 与 MQ7 传感器

数据以模拟信号输入，温湿度传感器 DHT11 则以数字信号输入。终端节点的供电电源采用 4 节五号电池，节点大部分时间处于休眠状态。按照每小时工作 4 分钟计算，4 节 5 号电池可以供终端节点工作时间长达 3 个月^[5]。无线节点的硬件原理图如图 3 所示。

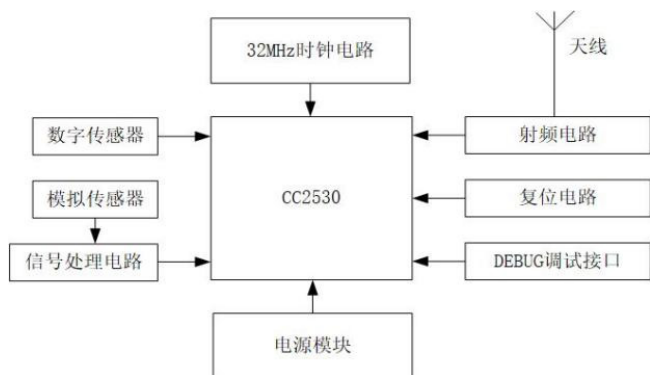


图 3 ZigBee 无线节点硬件原理图

2.2 继电器控制单片机硬件设计

ZigBee 无线传感器网络的数据传输到远程服务器，需要添加例如基于以太网、4G 等技术的单片机作为中继设备。本文采用 CAN 总线将矿区与地上管理系统进行连接。

CAN 总线是现场总线的一种，其仲裁方式具有较高的可靠性，可形成多主机网络，并联多个矿区以及在总线上拓展其他系统。连接在 CAN 总线上的节点根据报文前 11 位字符的仲裁场确定优先级，判断是否接收此报文。信号采用差分方式传输，当 VCAN-H 与 VCAN 两根数据线上的电压差很小时，被称为“隐性状态”，电压差大于最小阈值被称为“显性状态”^[6]。“隐性状态”代表数据“1”。“显性状态”代表数据“0”。加之 CAN 总线两端通常设置防止信号反射的终端电阻，这使 CAN 总线能更好地抑制共模干扰。图 4 表示 CAN 总线由隐性状态到显性状态，再到隐性状态的过程。

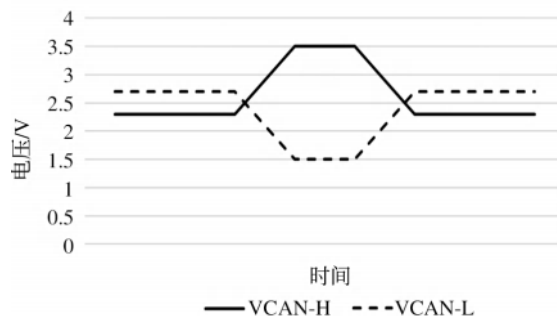


图 4 CAN 总线传输状态

本文采用 Cygnal 公司推出的 8 位单片机 C8051F040 作为中继设备，其内核支持 CAN2.0A 和 CAN2.0B 协议。外接 PCA82C250CAN 收发器对 CAN 控制器与 CAN 总线在物理层进行隔离，实现 CAN 总线收发能力。继电器控制单片机硬件设计包括电源电路、时钟电路、复位电路、USB 下载电路等基本电路。包括 M25P32 具有 32MB 串行 flash 存储器，LCD12864 显示屏与矩阵键盘等。继电器模块在煤矿气体超标时应根据有害气体类型与浓度，以 CO 气体为例，当浓度低时应启动包括轴流风机与离心风机为主的排风设备，加速气体流通。当浓度较高时，则关闭排风系统防止有害气体进一步扩散。当甲烷气体超过安全阈值时，应关闭钻掘机、装载机、皮带运输机等机械设备，防止火花引发爆炸。继电器控制单片机硬件原理图如图 5 所示。

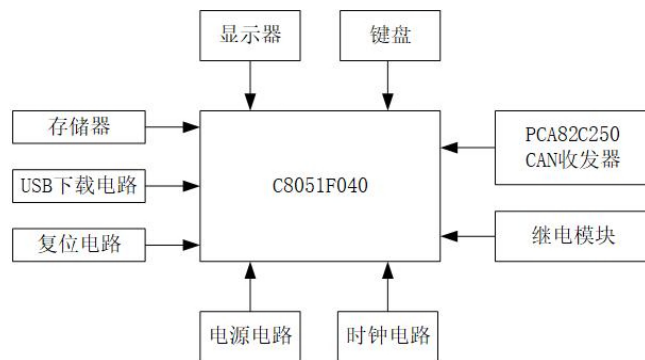


图 5 继电器控制单片机硬件原理图

3 软件设计

3.1 无线节点软件设计

本系统中无线节点的软件体系结构采用美国德州仪器公司（TI）提供的 Z-Stack 协议栈，并在 IAR 开发环境下进行开发^[7]。该协议栈将 IEE 802.15.4 的各层协议集成为函数库，并提供给用户应用程序接口（API），以实现各种应用功能。这使用户可以更专注于应用逻辑，不需要涉及硬件底层逻辑的具体实现。图 6 为 IAR 开发环境中协议栈文件夹，MAC 层管理无线介质的接入，并提供设备管理、信道访问等功能。网络层组织控制 ZigBee 网络的拓扑、路由以及网络安全。用户程序编写应用层，通过程序接口访问底层协议，并通过编写高级语言实现应用功能。

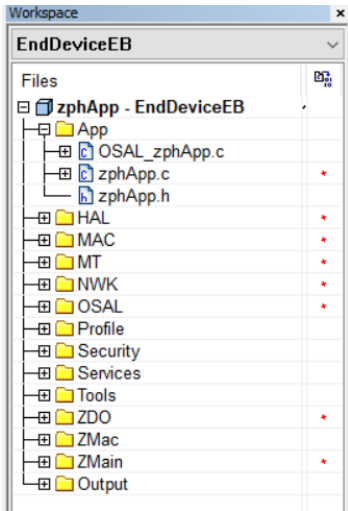


图 6 IAR 中 ZigBee 协议栈文件夹

ZigBee 节点的位置信息可通过以下三种方法获得：第一种方法是通过分析节点间信号强度，间接推算位置信息；第二种方法是通过 ZigBee 集成 GPS 模块获取位置信息^[8]；第三种方法是将节点编号连同数据信息一起传输给上位机，并通过位置映射确定节点位置。鉴于地下空间结构复杂、GPS 信号差等因素，采用第三种方法确定位置信息更加适宜。

在每个 ZigBee 网络中，至多存在一个协调器节点，该节点在硬件与协议栈初始化后建立无线网络，确定信道与网络标识（PANID），并等待其他路由节点与终端节点加入，并为其分配地址。ZigBee 协调器节点的程序流程图如图 7 所示。

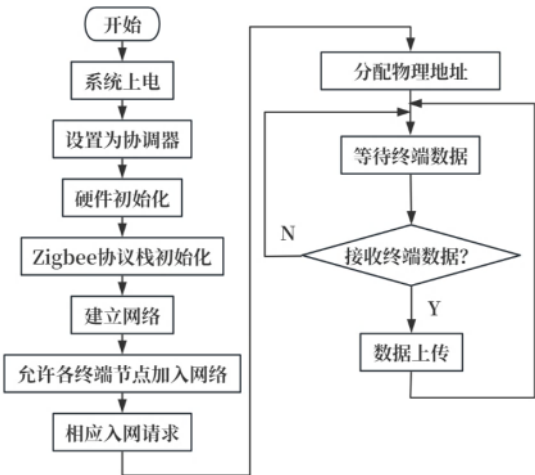


图 7 Zigbee 协调器节点程序流程图

终端节点上电初始化后发出组网信息寻找固定网络。当协调器不在信号范围内时，终端节点不断发出信标请求帧，若协调器响应，将发送关联请求命令。协调器收到后回复确认帧完成组网。终端节点组网程序流程图如图 8 所示。

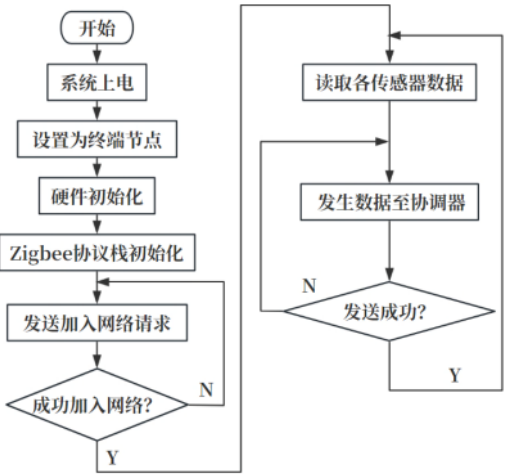


图 8 Zigbee 终端节点组网程序流程图

数据采集程序是 ZigBee 节点最后一部分程序。当系统上电后，终端节点进行包括硬件接口、协议栈、传感器、重置中断等初始化，启动时钟切换程序，提高时钟频率至 32MHz，节点在采集气体数据后进行均值计算，防止个别数据导致的误操作与报警。

3.2 上位机程序设计

本文中煤矿现场气体监测系统的上位机设计采用美国国家仪器公司（NI）推出的 LabVIEW 软件，其最早诞生于 1986 年作为实验室虚拟仪器的工作平台，其定位是作为虚拟仪器辅助工作，采用图形化 G 语言进行编程。LabVIEW 支持传统的程序调试，如单步执行、设置断点等。函数选项中内置了常用 VI 模块如串口控制、数据显示等供用户调用^[9]。LabVIEW 程序的优点是程序的模块化设计并且简单的可视化编程，并且包括可以进行信号处理、控制系统、图像处理等大量的工具包，可作为本系统进行上位机软件设计。

在 1993 年，NI 公司开发出虚拟仪器软件架构（VISA），是 LabVIEW 的核心工具包之一。它使 LabVIEW 与不同厂商硬件设备具有交互功能，不仅支持示波器、信号发生器等常用硬件仪器，还支持常用通信协议，如 USB、TCP/IP、CAN 等。VISA 工具包中集成常用的基本通信函数，如图 9 所示配置串口函数，包括选择 VISA 接口、设置波特率等设置。

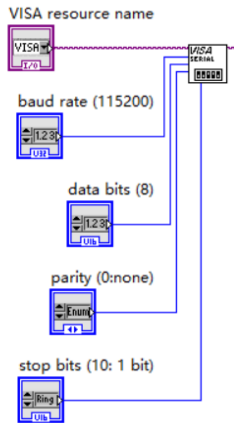


图 9 VISA 配置串口设置

对于 ZigBee 网络的上传的信息，通过对字符串截取的方式对节点位置、气体含量进行分析。在图 10 所示的条件控制结构中，根据截取的节点号，确定并区分不同无线数据节点上传的数据，进入不同的条件分支进行显示与保存。本程序设置 3 个条件分支，在每个条件分支内，对数据字符串进行进一步处理，将温度、湿度、CH₄ 含量、CO 含量实时显示，更清晰地展示气体浓度变化。程序可设置各项参数的报警阈值，一旦气体含量超标，LabVIEW 前面板的报警指示灯启动并产生声音报警。

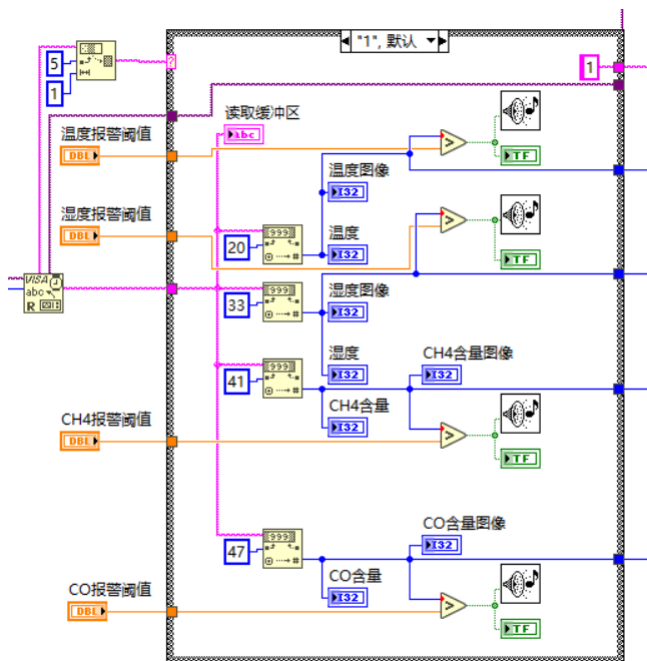


图 10 LabVIEW 数据显示程序

本文使用 LabVIEW 中的 ADO（ActiveX Data Objects）组件连接 MySQL 数据库。MySQL 数据库具有免费开源、简单易用、性能优异等特点。在上位机安装 MySQL ODBC 驱动后创建 ADO 连接，使用数据库可识别的 INSERT INTO 语句与字符串连接函数将数据保存至 MySQL 数据库，保存至数据库程序实现如图 11 所示。

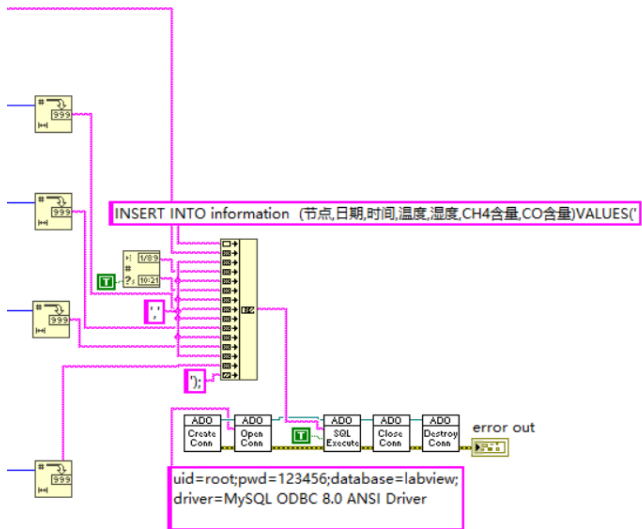


图 11 LabVIEW 保存数据程序

最终的数据库显示由 Navicat 软件实现可视化，其可对数据库进行浏览、创建、修改、删除等操作^[10]。同时也提供例如用户管理、权限管理等数据管理员功能，对不同操作人员设置不同访问权限。

4 系统测试

LabVIEW 前面板用户显示界面如图 12 所示，是通常的人机交互界面。软件从串口接收数据，对数据进行节点位置分析、读取节点数据信息，实时显示多个节点的气体含量信息并绘制图像。若有害气体超标将会触发报警，报警灯发出警告，并显示警告位置与类型。数据库的显示界面如图 13 所示。

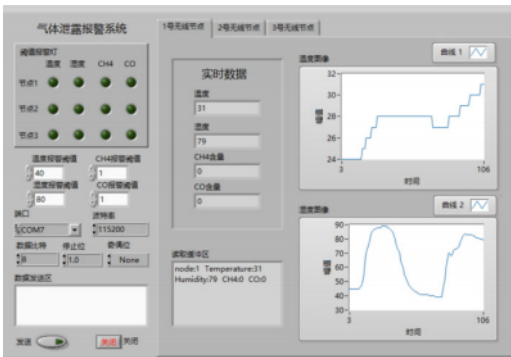


图 12 LabVIEW 上位机前面板界面

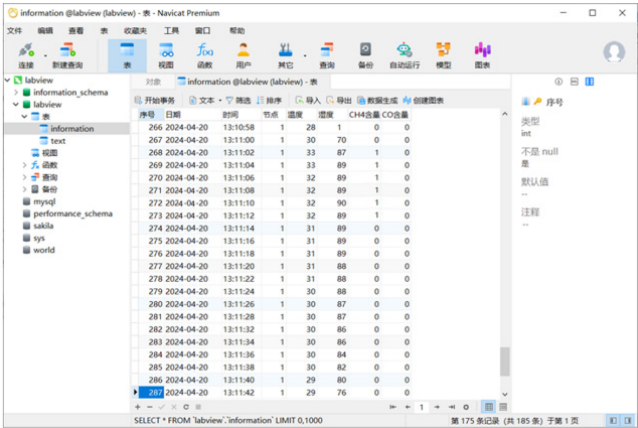


图 13 数据库显示界面

5 结束语

综上，根据井下煤矿现场作业的特殊环境，本文提出了一种用于监测现场有害气体的 ZigBee 无线传感器网络与 CAN 总线相结合的煤矿气体监测系统方案，并设计 LabVIEW 上位机显示程序。经过测试，可以满足对井下煤矿有害气体监测的要求。系统操作简便、成本低、抗干扰能力强等诸多优点，对煤矿的安全生产有积极意义。

参考文献

[1] 王垒. 内河航道智能航标系统的研究与开发 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.

[2] 潘琳. 基于 ZigBee 技术的温室大棚环境参数远程监测 [J]. 时代农机, 2018, 45 (11): 232-233.

[3] 张国金, 邹宁波. 基于 MySQL 的玻璃厂工艺数据归档方法 [J]. 建材世界, 2014, 35 (5): 68-73.

[4] 赵国良. 基于 FPGA 的 CAN-USB 协议转换系统的设计 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.

(下转第 88 页)

(上接第 63 页)

- [5] 吴平. 基于无线传感器网络的智能楼宇安全系统的设计 [J]. 自动化技术与应用, 2014, 33 (3): 99-102.
- [6] 刘宇明, 李辉, 苏进. 射频识别技术在电网通信设备中的应用 [J]. 云南电力技术, 2011, 39 (3): 41-42.
- [7] 侯雷, 张艳芹. ZigBee 无线传感器网络协议及仿真设计 [J]. 微型电脑应用, 2011, 27 (3): 58-61, 6.
- [8] 杨春华, 王章瑞, 谢瑜. 基于 ZigBee 的无线网络协调器节点的设计 [J]. 仪器仪表用户, 2010, 17 (6): 58-60.
- [9] 曹瑞. 计算机虚拟仪器环境 LabVIEW 下语音信号的采集 [J]. 福建电脑, 2010, 26 (3): 163.
- [10] 易欣. 采空区可燃性气体爆炸特性研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2006.

(收稿日期: 2024-08-12)