基于无线瓦斯传感器网络的井下瓦斯安全监控设计

李军飞 梁久祯

（江南大学物联网工程学院，无锡 214122）

摘 要：设计了一款超低功耗智能瓦斯传感器，将传感器连接到telosb节点传输模块，经过zigbee多跳组网协议构成无线传感网络，通过管理节点将数据传输到远程服务器进行信息处理，构成我们的瓦斯安全监控系统;实现了无人操守对井下多点监测、安全预警和智能控制。标准的串口通信和命令实现传感器的智能化控制；网络多节点分时轮询采集技术、传感器开关通断控制和冷启动采样将采样频率缩减到1min以内、telosb节点和传感器模块平均功耗从81mA降低至2.5mA以下;实验证明系统能在正常情况下连续运行2个月以上并能保证系统稳定、数据实时准确.

关键词： telosb;TinyOS;无线传感网络;瓦斯传感器;分时轮询

中图分类号：TN92;TP277 文献标志码 A

**Design of underground security monitoring system based on wireless gas sensor network**

Junfei Li , Jiuzhen Liang

(Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122,China)

**Abstract:** Designed an ultra-low-power smart intelligent sensor, the sensor is connected to the transmission module of telosb node, multi-hop networking protocol after zigbee wireless sensor networks composed by management node to transfer data to a remote server for information processing, constitute our gas safety monitoring system. Thus, the system can conduct a multi-point monitoring and down-hole safety warning with no person involved. Standard serial communications and commands help the system achieve intelligent sensor control; multi-node polling time-sharing acquisition technology and sensor switch-off control and cold start sampling make the sampling frequency is reduced to less than 1min, make average power consumption of telosb node and sensor module average reduced to less than 2.5 mA from 81mA. Experimental results show that the system can run stability continuously for more than 2 months under normal circumstances And guarantee the data are real-time and accurate.

**Key words:** telosb; TinyOS; wireless sensor networks; differential op amp circuit ;Cold start

0 引言

煤矿地理环境非常复杂,环境恶劣,存在诸多安全隐患,而瓦斯是煤矿事故发生的罪魁祸首。在过去矿井由于操作没按照严格的程序和检测设备的落后而引发无数瓦斯爆炸，无数的生命和财产被无情的夺走。因此在安全生产中对瓦斯气体的监测显得尤为重要。从而引发了国内外无数学者的不断探索[1-6]。

关于井下的安全监控，国内外的研究人员做出了大量的研究设计. 文献[1] 提出的传感网络自意识自适检测网络中出现多边形洞的技术来实现井下塌方检测，缺陷检测必须将整个网络所有节点信息汇总后进行数据处理后才能发现，却不能实现单个传感器的智能感知、发现和控制。文献[2] 提出的多传感器数据融合技术来监测掘进面巷道内的实时瓦斯平均浓度，实现检测灵敏度和准确率，但没有使用多跳的无线传感网络进行数据传输，使得数据获取有很大实施难度。文献[3]设计的智能瓦斯传感器实现硬件系统具有结构紧凑、性能可靠，但是并未从功耗角度考虑，在井下瓦斯传感器部署麻烦，必须经受长时间考验。

根据实际井下开采瓦斯监测的需求，我们着重从低功耗、智能、无线数据传输等方面考虑，在文章的第一部分详细的介绍了我们瓦斯气体传感器的设计中如何实现超低功耗和智能的基本原理，第二部分介绍了使用telosb节点组网数据采集，介绍分时轮询采样技术来提高采样频率和进一步降低节点功耗;最后设计了两组实验，通过采集数据分析对比，证明我们的设计在一定的程度上有了不少的提高。

1井下瓦斯气体监控需求

如今井下瓦斯探测一般使用单体瓦斯传感器，其体积大、部署步骤麻烦、价格昂贵和需要人工管理等缺陷；在微型瓦斯传感器中，红外、催化燃烧式、热阻体、半导体式为常用瓦斯传感器类型，都存在功耗大的缺陷，后两者有传感器寿命短、受环境影响大缺陷。随着物联网技术的不断创新和进步，大规模无线自组织多跳传感器网络技术不断成熟并应用在井下生产；使得井下安全监控系统利用大规模自组织网络将瓦斯监测数字化、智能化、实时预报险情成为了可能。通过无线传感网络技术，对所有传感器进行统一管理，实现井下瓦斯气体浓度无人值守全天候采集、智能控制。一旦发现险情立即发出预警信号和控制，提前进行通风处理或人员疏散，实现进行智能安全监控。这里着重介绍无线传感网络及硬件设计部分。

2低功耗智能瓦斯传感器设计

低功耗智能瓦斯传感器是一款面向低功耗、智能的传感器。分为感知部分和数字部分.感知部分的传感器采用的是英国CITY公司的4p-90 CiTipeL[7] 三电极催化燃烧式传感器，其优点在于输出灵敏度为30±6mv/%CH4、响应速度快、检测线性好工作电压低的优点。在输出端提供标准化的串行通用接口（uart）和通信格式，通过标准命令集来配置系统参数，使瓦斯智能传感器切换到不同工作模式，实现功能的调整和低功耗的目标.智能部分采用低功耗单片机msp430g2553，通过编程实现瓦斯气体浓度自动检测、自动校准、自动补偿，并以数字信号输出给上层应用程序。硬件部分（如图1）分为以下内容。

2.1 感知部分

感知部分主要通过瓦斯气体的浓度的变化将会使传感器产生微弱的电流变化，然后通过运放电路将信号放大到区间0~2.5V间的模拟信号，最后输出给模数转换部分进行数字信号的转换。

感知原理是模拟信号采集用惠斯通电桥原理，其原理相当于一个滑动变阻器桥，如图1，传感器的三个引脚、和,在它的测量桥上涂有催化物质，在整个的测量过程中是不被消耗的。即使在空气中气体和蒸气浓度远远低于爆炸下限（LEL）时，也会在这个桥上发生催化燃烧反应，正常情况下，参比桥的电压比事先通过滑动变阻器调节到压差为0，使得电桥平衡，即输出为零。如果有可燃气体存在，它的氧化过程会使测量桥被加热，温度增加，而此时参比桥电阻不变。电路会测出它们之间的电阻变化，>，输出的电压同待测气体的浓度成正比，这样我们就可以将我们的线性输出给运放器进行信号放大处理。

**运放原理：**采用差分运放原理对惠斯通的输出端差分进行运放。它能够抑制零点漂移、对输入偏置电流最小偏移误差等特点；运放器采用低功耗、性能优越的LTC1049运放器；主要负责将信号放大，如图1b，差分运放公式；

(公式1)

根据瓦斯实际的浓度范围和爆炸极限将的范围调整到0~25mv区间内，这样信号就可按比例放大100倍，就被运放到了0~2.5v区间内，达到了单片机模数转换（ADC）的要求，同时还可以根据需求更换,的值来更该运放的比例。根据实际需求将电阻原件值设置为:

根据 公式1有：

对此，我们还对瓦斯传感器体进行气标定，根据爆炸极限浓度5.0％～15％之间，煤矿安全规程规定瓦斯浓度超过1.5%就算安全事故并追查事故原因[8]。预设1.0％时的探测电压值为警戒电压，超出此界限通过软件进行提前上报预警。



图 1 硬件原理图

**Fig. 1 Hardware schematics**

2.2数字(智能)部分

数字部分主要包含将感知部分感知到的模拟信号进行模数转换（ADC）、与telosb节点信息交互、智能控制等内容，最终实现瓦斯传感器的低功耗和智能控制的功能。主控芯片为单片机msp430g2553，它是16位的低功耗微处理器，具有内置的16位定时器、16KB的FLASH和512B的RAM，具备通用串行（uart）通信能力，通过串口实现智能交互、智能控制和配置设备正常运行的系统参数。

系统的硬件设计主要内容有(如图 1)；传感器与电阻构成惠斯通电桥，输出的差分信号经过LTC1049芯片进行差分运放出模拟信号，最后通过单片机对进行模数转换成数字信号。

**低功耗设计：**虽然msp430g2553为低功耗单片机，正常工作下电流大小为230uA,但根据4p-90 CiTipeL的数据手册[7],在标准的工作电压3.3v工作下，探测器的工作电流为757mA；这使得传感器在普通两节干电池供电的情况下的最多只能连续工作2个工作日，根本就无法满足需求；一般传感器隔数分钟才采集一次。针对上述情况，我们设计了一个专门开关，如图 1a；采用BL1551开关芯片，将感知部分与数字部分隔离开来，通过msp430g2553单片机Pin 5作为使能端（ENB）对BL1551的使能端进行控制，从而达到对高消耗的感知部分通断控制，在需要采集感知数据时打开模拟部分开关，让其采集数据，采集后关闭模拟部分电源，从而实现模拟部分功耗节省，实现传感器整体寿命大大延长。

**冷启动模式采样**：并非所有的传感器一上电之后就能立马读取感知信息，传感器都是有一个预热的阶段.一般情况下，打开传感器电源之后，等待一个预热的时间，当传感器的的数据稳定之后才读取正确的数据，否则会造成读取脏数据。4p-90 CiTipeL的预热时间大约为10s，针对前面设计开关通断功能，模块经常进行开断操作，而数据又不能立即读取；同时要求管理节点能以主动方式请求传感器数据；为此，我们专门设计了冷启动采集模式，如图2；其运行步骤如下，①telosb节点（node）向传感器发送采集数据命令0x83；②传感器（sensor）收到消息后，向node汇报确认消息包1（采集指令已收到，请等待一个预热处理时间T后再接收感知数据）；③sensor打开模拟部分开关；④⑤等待预热时间T；⑥sensor采集数据，判断数据是否超越警戒值，并将传感数值及消息上传给node；⑦node收到消息后进行数据处理，并结束本次通话。

图2 冷启动序列图

**Fig.2 Cold start sequence diagram**

通过这样的一个冷启动过程，解决了开关控制读取脏数据的问题。解决了低功耗和数据准确性、实时性和有效性之间的问题。使得低功耗成为可能，唯一的代价就是采样时消耗了8~10秒的预热时间，这对于绝大多数无线传感网络还是可以接受的.

**智能模式**：智能低功耗瓦斯气体传感器的智能模式主要是通过C语言程序智能判断和信息交互设计实现。包含有冷启动、传感器模拟信号进行模数转换（ADC）、参数设置和保存、信息交互、瓦斯浓度超标检测警报和定值校准。

智能传感器提供了五种运行模式，支持标准命令集控制[6]，如图3所示。

图3系统运行模式

**Fig.3 System operating mode**

模式1为低功耗连续运行模式：系统上电复位后运行在此模式下，空闲时间都处于休眠状态，只有uart中断的到来，才会将单片机唤醒；根据接收的命令格式切换到以下其他的运行模式中去。

模式2为冷启动模式：主要负责瓦斯传感器数据采集部分，通过node和sensor之间协作，采集环境中的真实瓦斯浓度值。

模式3为预警模式：在模式2冷启动模式中，当判断感知数据超过预警值，传感器会重新打开感知模块电源，连续采集3次，确保真实浓度超过警戒范围，向串口发送出警报的消息。

模式4为定值校准模式：进入此模式后，智能传感器返回0x22，准备接收命令;此时可以设置气体浓度值，并以此为基准线性输出，完成后进入超低功耗连续运行模式。

3瓦斯安全监控系统无线网络设计

如今很多的安全监控系统都使用无线传感网络作为系统的基础架构[1][4];该系统以瓦斯传感器(图4 左4)作为感知部分，telosb节点(图4 左3)作为传输部分，telosb节点是基于tinyos平台的无线传输节点，工作频段为2.4GHz为免费工业、医疗、科研使用频段。这样瓦斯传感器结合telosb节点传输模块够成了我们的安全监控系统的网络节点。组网协议为汇聚树协议（CTP）[2]如图5.

网络的管理节点（sink）就可以向普通节点（node）发送请求数据包，普通节点收到消息包后，打开采集模块进行数据采集，采集后，就将该包以多跳的方式传送到sink节点，实现了对井下环境多点检测，通过sink节点连接外部网络，将数据上传到远程服务器，实现在线对环境进行实时跟踪。

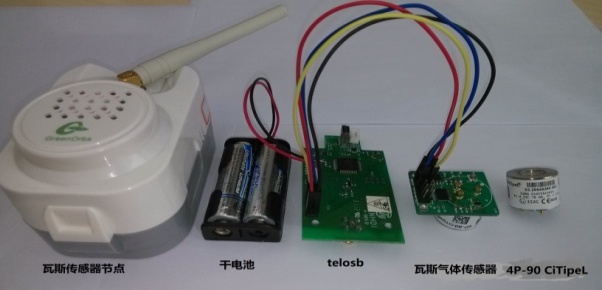


图4 瓦斯传感器节点

**Fig.4 Gas sensor nodes**



图 5 系统部署图

**Fig.5 System deployment diagram**

智能低功耗瓦斯气体传感器虽然能够通过开关将传感器长期带入低功耗状态，延长了传感器的寿命，但是过长睡眠时间使得传感器不能及时采集环境中的瓦斯浓度，这样会造成在传感器采集后没发现任何异常，而在很短的未来井下突然涌现出大量瓦斯气体，睡眠中的瓦斯传感器不能及时的预报险情，会造成系统的失效和险情的发生；另外，如果缩短传感器的采样频率，频繁的开断会使得低功耗的效果不明显。针对这个问题，提出了多节点分时轮询采样的方案。

3.1多节点分时轮询采样[5]

针对以上问题和井下的实际情况，在我们设计的无线传感网络中(如图5)，通过汇聚节点（sink node）对整个网络中的n个node统一管理。Sink node在每个时间间隔t，随机的抽取网络中的一个节点node[R (n)] 请求其上传瓦斯浓度值，其中R (n)表示剩余n个节点中随机抽取节点号， t1、t2、t3、…、tn时刻分别对应节点node[R (n)]、node[R (n-1)]、node[R (n-2)]、…、node[R (1)]。当num=1时，重新赋值num=n;回到新一轮轮询采样。算法如下：

void DivdeTimeCycleSample(Node[] nodes,int num){

while(true){

int count = num;

while(num > 0){

sleep(60000); //轮询周期10s

int n = random(num--);//随机数

requestSense(nodes[n]);//节点n采样

MoveToTail(nodes[n]);//移动节点n到末尾

}

}

}

通过以上步骤一轮循环中每个节点轮流上传一次采集数据;每个节点周期nt时间才上传一次，上传的频率大大减小，使用寿命大大的延长，网络的采样频率t也得到增强；另外还可以对井下不同区域的多个点进行采集，能够有效的防止单个节点出现盲区的现象，大大提高体统的稳定性、可靠性、实用性。

4实验

为了验证系统在低功耗、实用上具有明显的优势，设计了两组实验对比分析其效果。实验都以两节标准的1800mAh干电池供电.

实验一测试telosb节点和瓦斯传感器组网运行时不同的轮询周期节点平均工作电流和寿命对比 (其中telosb节点网络通信的平均电流在1mA左右，瓦斯传感器低功耗模式的平均电流在0.3mA左右) .瓦斯传感器工作在开关通断的模式下。从图6可以发现，周期越长平均功耗越小、寿命越长；当自组网络的周期达到10 min以上时平均的工作电流下降到2.5mA以下，同时节点的寿命也达到了2个月以上。部署20个左右节点就可以达到对井下200~300m2区域1min内检测一次，基本上能够满足应用需求。周期数超过20min需要增加节点数来提高采样的频率，效果不明显，最好保持在10~20min的合理范围之内。

图 6 平均电流和寿命对比

**Fig. 6 average current** **and lifetime Comparison**



图7 采样频率和寿命对比

**Fig.7 sampling frequency and lifetime Comparison**

实验二主要测试开关、组网分时轮询采样技术的效果，实验对象为开关一直打开节点（图6左），单节点5min采样一次（图6中），网络多节点20min采样一次（图6右）。

从图7发现无开关节点运行不到2天就电量消耗过度死亡，单节点开关控制模式，虽然取得了35天以上寿命，但其5min间隔，使系统的实时性比较差，多节点网络采样虽然牺牲了多个节点的代价，寿命延长到70天左右.采样频率下降到1分钟以内，实时效果非常明显，多节点协调工作还能多跳的方式实现对井下大范围多个探测点进行测量;另外还能进行一些消息处理，使系统拥有不错的鲁棒性和容错能力。

5结语

低功耗智能瓦斯气体传感网络安全监控系统主要是为煤矿开采而专门设计的一款符合实际需求的系统，在设计各个模块时都综合考虑低功耗，包括低功耗单片机、低功耗开关，低功耗运放器以及电路的气体元器件的功耗，尤其的控制开关的设计，使得高消耗的4p-90 CiTipeL长时间处于断开状态，大大延长了传感器节点的寿命。智能传感器还提供通用的命令集，能够进行动态的校准、控制和预警。同时使用传感网络大面积多节点覆盖、随机多节点分时轮流采样，提高了系统的反应速度、采样精度和可靠性。后期我们希望实现整个网络的数据通过sink连接以太网将数据传输到远程服务器，动态实时的显示井下的环境瓦斯浓度值，远程监测和控制能及时发现预警，实现远程安全智能监控。

参考文献

[1] Mo Li,Yunhao Liu. Underground Structure Monitoring with Wireless Sensor Networks[c]. 6th international conference on Information processing in sensor networks,2007,69-78

[2] [田春燕](http://social.wanfangdata.com.cn/Locate.ashx?ArticleId=zzyzdh201307021&Name=%e7%94%b0%e6%98%a5%e7%87%95),[惠华先](http://social.wanfangdata.com.cn/Locate.ashx?ArticleId=zzyzdh201307021&Name=%e6%83%a0%e5%8d%8e%e5%85%88).基于数据融合的多传感器瓦斯监测系统设计[J].制造业自动化, 2013, 35(7)

# [3] [辛斌](http://social.wanfangdata.com.cn/Locate.ashx?ArticleId=guig201017077&Name=%e8%be%9b%e6%96%8c).一种新型智能瓦斯传感器硬件电路设计[J].[硅谷](http://c.wanfangdata.com.cn/Periodical-guig.aspx) , [2010, (17)](http://c.wanfangdata.com.cn/periodical/guig/2010-17.aspx)

[4] 李丰杰,徐守志,徐波.[面向矿井安全监测的无线传感器网络设计](http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-WHYC201202022.htm)[J].三峡大学学报(自然科学版),2012年02期

[5] 高明明,杨贵洲.基于无线网络的矿井安全监控系统设计[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011年06期

[6] 姚伟斌.面向数据采集的无线多跳轮询网络的设计与实现[D],浙江：浙江大学,2008

[7] 刘龙. 基于 IEEE1451 标准的无线智能传感器节点研究[D]. 国防科学技术大学, 2007.

[8] 刘广玉. 新型传感器技术及应用[M].航空航天大学出版社,1995,5

[9] 陈健,杨志义,王敏.无线传感器网络数据汇聚协议CTP的仿真与研究[J]. [现代电子技术, 2011年06期](http://www.cnki.com.cn/Journal/I-I1-XDDJ-2011-06.htm)

[10] 4P-90 CiTipeL product data sheet. <http://www.sec-sensor.com/PDF-files-link/Combustible/4p90.pdf>, (Nov 29,2013）

**作者简介**

李军飞，男，汉，湖南邵阳，硕士，无线传感网络与定位技术。

梁久祯，男，汉，山东，教授，无线传感网络与定位技术、数字图像处理