

Multiparameter Fire Detection Node Based on Wireless Sensor Network*

LIU Shixing^{1*}, ZHANG Yongming², GU Qindong¹

(1. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

Abstract: Multiparameter fire detection nodes based on Wireless sensor network is designed, which can detect temperature, humidity and smoke concentration. The distorted fire rate is decreased with multiparameter coincidence technique. And a shortest path routing algorithm is proposed according to multi-hop transceiver based on CSMA/CA principle; the sensor nodes can connect each other automatically, the sensor data can be transmitted within minimum hops. Using this type nodes, a real-time fire monitoring system is built up. As the experiment result; the maximum distance of single hop transmission is 100m, the delay time of every hop within multi-hop communications is about 50ms, the sensitivity of fire smoke reaches the first class level, the parameter of humidity is used to eliminate the distorted effect of water vapor.

Key words: wireless sensor network; WSN node; fire detection; multiparameter; multi-hop; routing algorithm
EEACC: 7230; 6150P

基于无线传感器网络的多参数火灾探测节点研究*

刘士兴^{1*}, 张永明², 顾勤冬¹

(1. 合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 合肥 230009;
2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

摘 要: 设计了基于无线传感器网络的多参数无线火灾探测节点, 实现对温度、湿度和烟雾的自动探测, 通过多参数符合探测方法来降低火灾误报率, 实现对火灾的可靠监测。针对火灾特征参数多跳传输提出一种基于 CSMA/CA 机制的最短路径路由算法, 探测器能自动组网实现对火灾特征参数的无线实时监测。实验结果表明, 探测器单跳通信距离最远可达 100 米, 多跳通信每跳传输延时约 50 ms, 对火灾烟雾响应达到 I 级灵敏度, 湿度参数可有效消除水汽引起的火灾误报。

关键词: 无线传感器网络, 节点, 火灾探测, 多参数, 多跳, 路由算法

中图分类号: TP393; X932

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)06-0883-05

火灾探测是通过检测火灾特征参数信号, 判断火灾是否发生, 是实现火灾预警的重要手段, 传统的火灾探测报警系统采用有线方式, 监控报警信息通过有线网络传输到中心站。在古建筑消防等特殊场所, 有线火灾报警系统的布置会对建筑物的功能性与艺术性造成一定程度的破坏。无线火灾报警系统没有布线要求, 安装方便、可以最大限度地减少对建筑物的破坏, 是古建筑消防比较好的实现方式; 无线传感器网络的自组织性, 使得探测系统可以在极短的时间内完成自动组网。火灾探测系统的数字化与网络化也是当前的一个发展方向, 深入研究基于无线传感器网络的多参数火灾探测技术, 开发高可靠性的早期火灾探测系统, 是实现无线火灾探测的有效手段^[1-2]。

1 无线传感器网络与火灾探测

无线传感器网络通过无线网络通讯的方式, 实现感知和获取客观物理世界的参数信息。无线传感器网络是应用相关的网络, 针对具体应用来研究无线传感器网络技术, 是无线传感器网络应用研究不同于传统网络的显著特征^[3]。传感器节点能够灵敏地感应环境参数的快速变化, 具备实时性和检测精度高的优点, 在无人值守的环境监测、灾害扑救等特殊领域, 无线传感器网络具有传统技术无可比拟的优势^[4-5]。

基于无线传感器网络的火灾实时监测, 是通过把大量廉价的微型低功耗传感器节点布置在监测区域, 所有的传感器节点自动组成无线网络, 实时采集

项目来源: “十一五”国家科技支撑计划, 以布达拉宫为代表的高原古建筑火灾安全技术研究课题资助(2006BAK0607)

收稿日期: 2009-11-25 **修改日期:** 2010-03-09

温度、湿度、烟雾浓度和光亮度等环境参数,实现对监测区域异常情况的迅速反映。结合高效的传感器网络节点和火点定位算法,可以迅速、准确地查明火源发生地点;在火灾预测预报与蔓延模型支持下,利用实时获取的数据不断对模型进行修正,实现对敏感区域火险的精确预测预报^[6]。

无线传感器网络火灾监测系统如图 1 所示^[6],在监测区域内部署多个感知火灾参数的探测节点,一个与计算机连接的基站作为汇聚节点,探测节点通过自组织方式组成具有多跳路由功能的网络,基站负责将所有探测节点的数据传给计算机进行处理。

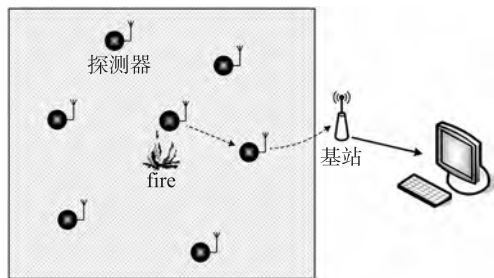


图 1 无线传感器网络火灾监测系统示意图

2 多参数无线火灾探测节点

智能型火灾探测器将信号探测及信号处理集成在探测器内部,微处理器对采集到的数据就地处理,信号的真实程度得到提高。内部融入不同类型的火灾判断算法,还可以对周围环境的变化进行有效的跟踪补偿,使得火灾探测的可靠性大大提高。由于探测器与控制器交换的数据量小,相应受干扰的几率降低,在通讯协议上通过数据校验进行错误判断,更增加了系统的可靠性^[1-2]。火灾探测节点的硬件结构如图 2 所示,由无线传感器网络通信节点和多参数火灾探测单元组成。基站在硬件结构上没有火灾参数探测单元,专门负责传感器网络的数据传输与收集。

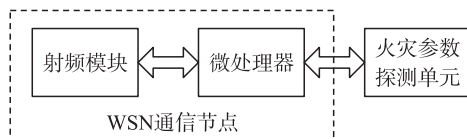


图 2 火灾探测节点的硬件结构

2.1 多参数复合火灾探测单元

火灾探测单元由温湿度探测和光电型烟雾探测两个模块组成,分别实现温湿度和烟雾浓度的探测;探测模块采用低功耗设计,温湿度传感器平均工作电流 28 μA ,烟雾探测放大器平均工作电流约为 0.5 mA。

光电感烟机理是烟颗粒和光相互作用时,粒子以同样波长再辐射已经接收的能量,通常在不同方

向上其再辐射强度不同,这个过程称为散射。火灾烟雾的监测采用前向光散射探测方式,主要由光学探测室及相关电路组成。光学迷宫位于探测室的外围,是烟雾进入探测室的通道,与遮光部件等组成探测室的光学暗室内腔,最大限度的减弱环境光线的影响。同时形成烟颗粒迷宫,以减少外界气流影响。烟颗粒信号检测是通过一对红外光发射和接收二极管实现的,微处理器控制红外发射二极管向光学探测室内发出脉冲光,探测室内无烟颗粒时,由于遮光板的阻光作用,光线不能射入接收二极管,因此无信号输出。火灾发生时,有烟颗粒进入光学探测室,红外光经烟颗粒散射到达光敏二极管,产生电流信号,且散射光信号随烟雾浓度增加而加大,信号经微处理器内嵌 ADC 做模数转换作为烟雾探测数据。

温湿度监测采用智能型温湿度传感芯片 SHT11,提供全量程标定的数字输出。传感器包括一个电容性聚合体湿度敏感元件和一个用能隙材料制成的温度敏感元件,两只传感器分别产生相对湿度或温度的信号,信号放大后分别送至 14 位的 ADC 进行模数转换,经校准和纠错,最后通过二线串行接口将相对湿度数据送至微处理器。

2.2 无线火灾探测节点

无线火灾探测节点控制软件可分为四层,依次为:底层硬件驱动、通信协议层(MAC 协议和路由协议)、操作系统和应用任务^[7-8]。

底层硬件驱动包括射频芯片 CC2420 的驱动、探测器模块驱动以及微处理器驱动。微处理器通过 SPI 总线与 CC2420 通信,可方便地实现对射频芯片配置和数据收发,读写 FIFO 等。探测器模块驱动实现对传感器探测数据的获取,首先进行温湿度测量和获取数据;再启动光电烟雾探测,微处理器内嵌 ADC 实现对烟雾探测信号的模数转换,获得烟浓度数字量。微处理器进行火灾判断和数据打包的工作,应用任务层通过接口调用完成从火灾参数的探测到数据处理的一系列操作。

早期火灾信号具有随机性、非结构性和趋势特征等特点,常用的火灾探测采用直观阈值法,针对一个火灾物理参量如温度、烟雾等进行检测,当传感器获取参数值超过预设阈值时,则发出报警信号。这种火灾探测方法,存在抗干扰能力较弱,误报率较高等缺点^[9]。火灾探测信号的变化率是一个重要的特征,监测这一参数可有效减少阈值法引起的误报,例如当温度信号的上升率超过一定值时,表明温度发生了急剧变化,这是火灾产生高温的典型特征。然而,探测器对减少有类似火灾的虚假现象如炊烟和抽烟引起的

误报的效果并不明显;因此,单一参数的探测器很难区分火灾的早期状态和类似的产生烟雾和温度信号的虚假现象,解决这类误报警问题,即采用多传感器参数的信号相关的算法^[11-12]。

综合多种因素,本项目采用的火灾探测算法如下:单节点火灾判据包括温度 t 、温度变化量 dt 、烟雾测量值 s 、烟雾量增加量 ds 。其中 t 和 s 是探测器采集的数据值, dt 为两次温度采样的差值,当本次温度比上次高时 $dt + 1$,否则 $dt - 1$;烟雾量增加值 $ds =$ 当前 ds 值 + (本次 s 值 - 上次 s 值)/8,如果 $ds < 0$ 则 $ds = 0$ 。在相对湿度值小于阈值的条件下,满足以下 4 个判据之一即判断有火灾发生,判据 1, $ds > 5$ 且 $dt > 3$;判据 2, $ds > 10$;判据 3, $t \geq$ 温度阈值;判据 4, $s \geq$ 烟雾浓度阈值。判据 1 是针对明火的,由于明火烟雾较少,但温度明显上升,所以当温度上升,且有少量烟雾时则可认为是火灾发生。判据 2 是针对早期阴燃火,当探测到烟雾有明显的上升时,认为发生早期火灾;判据 3、4 是采用阈值判断算法,在实验中温度阈值设为 $42\text{ }^\circ\text{C}$,烟雾阈值为 40% 。引入湿度条件旨在防止水蒸汽引起的误报,通过湿度的补偿,可以弥补光电烟雾探测对水汽敏感引起的误报。此外还设置了判据 5,即多参数神经网络判据,这种判据具有自学习能力可进一步减少提高火灾探测预警的准确性与可靠性。实验结果表明,烟温复合探测有效消除了粉尘等造成的烟雾探测器的误报。而在高温高湿度环境中会导致一般烟温复合探测给出错误的火灾警报,湿度参数的监测有效消除了液体冷凝引起的误报。

数据包格式:节点将数据直接组成 MAC 帧格式的数据包,存储在系统分配的数据包 FIFO 中,提供给通信层,使得 MAC 层在发送数据时不需再组包。

数据包内容如下:

1字节	11字节	1字节	2字节	2字节
包长度	MAC层头	报警标志	烟雾数据	温度数据
PSD长度	MAC层数据			

节点 MAC 层数据传输的信道接入机制采用 CSMA/CA 算法,算法中有三个重要的参数由每个要传送数据的设备去维护:NB(后退次数,初始值为 0)、CW(碰撞窗口,初始值为 2),BE(后退指数,初始值为 2)。

节点的单跳通信距离有限,针对火灾报警的实际应用,从低能耗和低算法复杂度出发,设计了一种最短路径的路由算法实现数据的多跳传送。节点在加入网络过程中在本地维护一个邻居节点列表,列表中存放的是距离基站跳数最少的邻居节点。传送数据时,节点将从列表中随机选择一个邻居节点作为下一

跳路由节点,该邻居节点再以同样方式转发数据,直到数据传到基站。例如图 4 中, h 表示跳数节点,节点 D 不在基站的通信范围内,数据需要通过邻居节点转发,图中节点 A 、 B 、 C 都是邻居节点,但是由于节点 C 到基站要经过 2 跳($h = 2$),若以节点 C 为下一跳节点则从节点 D 到基站为 3 跳,而 A 、 B 只需 1 跳,所以节点 D 会将 A 、 B 存放在邻居节点列表中,作为下一跳路由选择节点,使其到基站的跳数为 2。这样不仅降低了节点能耗,也减轻了网络负荷。

参考 IEEE802.15.4 标准,建立了包序号检查机制以保证数据包在传输过程中不发生重复传送,避免不必要的网络数据传送负荷^[7]。并采用数据传输确认机制和包序号检查机制保证数据传输的可靠性,目的节点收到数据包后,向源节点回复一个确认信息(ACK 帧)。源节点发送完一个数据包后,需等待目的节点发回一个确认帧,如果在预定时间内没收到 ACK 帧,则向目的节点重发该数据包。

应用任务主要包括:组网请求、火灾特征参数探测、数据发送以及数据接收和处理。为了提高系统运行的实时性和稳定性,满足探测节点的低功耗要求,应用任务的执行通过中断方式实现的。探测节点的软件工作流程如图 3 所示,在联网工作状态,控制器将执行火灾监测任务,采集温湿度和烟雾浓度数据进行分析处理,通过火灾判据算法确定是否有火灾发生,并发送判据结果。

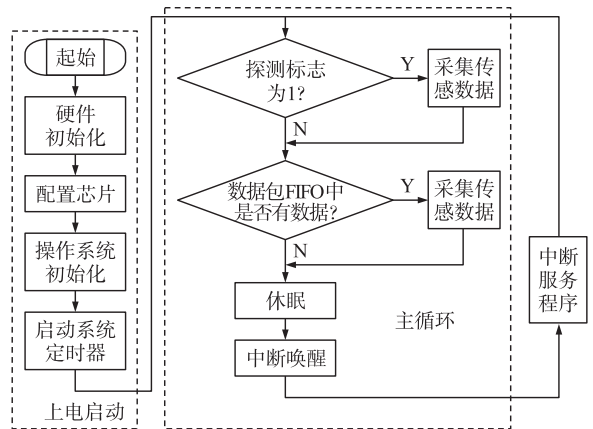


图 3 火灾探测节点工作流程图

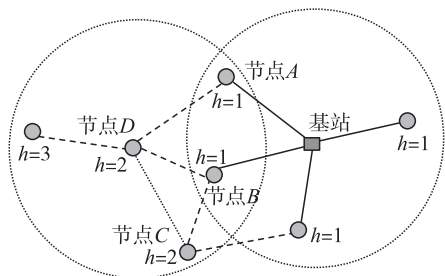


图 4 多跳网络拓扑结构

2.3 后台监测软件与数据处理

利用图形化编程工具 LabVIEW 设计了运行在 PC 机上的后台软件,处理分析传感信息和路由信息,显示相应节点的温湿度、烟雾浓度值以及节点的路由信息,并将多个节点火灾特征参数进行融合处理^[12]。

后台软件功能通过 5 个并行线程实现,线程 1 和线程 2 实现报警功能,当接收到的节点数据中判断发生火灾时,便发出声光报警;线程 3 读取串口数据并进行分处理,线程 4、5 实现节点间通信模拟和显示数据曲线。为进一步提高报警的准确度,减少误报和漏报,在探测节点首先进行初步判断,将数据传送到计算机上后再采用基于神经网络算法的数据融合技术,将节点送来的温湿度测量值和烟雾量及报警值三者融合处理。

3 实验测试数据

3.1 火灾探测灵敏度

参照 GB4715 - 2005 点型感烟火灾探测器试验国家标准,在标准火灾实验室内沿 3 米环布置 6 个本项目复合探测器节点,分别为节点 1 ~ 节点 6,另安装国内外具有代表性的点型光电感烟探测器 S_2 、 S_4 ,分别与节点 1 和节点 2 位置对称,以作参考^[6]。

实验采用棉绳标准火,图 5 是探测节点 1 和 2 与参考光电感烟探测器 S_2 、 S_4 的对比数据,其变化趋势一致,节点 1、2 对烟雾的响应时间小于有线光电感烟探测器 S_2 、 S_4 。图中阈值响应时间定义为:

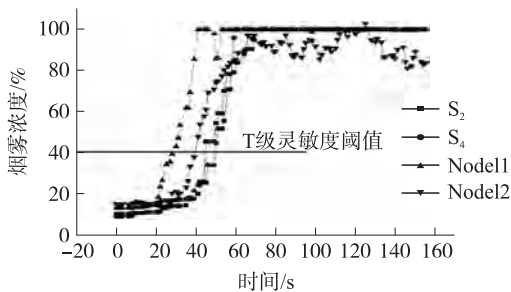


图 5 光电感烟响应曲线

阈值响应时间 = 系统报警时间 - 烟扩散时间,在特定实验环境下烟雾扩散时间是不变的,阈值响应时间决定探测器的灵敏度。

对于相同灵敏度(I级),节点 1 和 2 与参考烟雾探测器响应时间如表 1 所示。图 6 是探测节点 4 和 5 测量的温度与燃烧室系统热电偶 Res1、Res2 数据的比较曲线。

表 1 烟雾探测响应时间

探测器号	I 级灵敏度响应时间/S	满量程响应时间/S
Std2	38	65
Std4	43	53
节点 1	30	41
节点 2	41	61

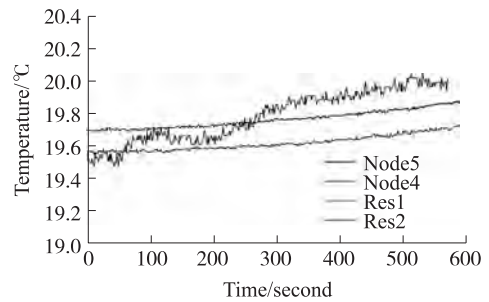


图 6 温度探测结果的比较

3.2 单跳通信距离的测量

无线收发芯片在全功率工作状态两个节点之间单跳通信传输距离最大为 100 m,无线收发芯片在超低功耗工作状态单跳通信传输距离最短为 55 m。

3.3 多跳通信传输时延测

利用多个通信节点和一个基站分别组成单跳和多跳的数据传输网络。节点定时发送一个固定的数据包,该数据包在网络中通过多跳传输至基站,基站收到数据包后,向源节点发回一个“信息确认”帧。源节点收到信息确认帧的时间 T_2 与数据发送时间 T_1 的时间差 $\Delta T = T_2 - T_1$ 作为数据传输延迟时间。

数据传输时延测试结果表明:单跳平均延时 3.2 ms、2 跳延时 59.4 ms,且时延比较稳定,3 跳、4 跳的平均时延分别为 109 ms 和 145 ms,但变化比较大,考虑不大于 4 跳情况,每增加 1 跳,数据平均传输延时增加约 50 ms。由于通讯协议层采用的 CS-MA/CA 机制,数据每跳的传输延时除了信号传播的延时和数据接收处理的延时外,还有一个随机延时,且随着路由跳数的增加,该随机延时的影响也变大。

4 结论

采用微型化、低功耗烟雾、温度和湿度复合探测单元,与无线传感器网络节点集成研制了多参数无线火灾探测节点;设计的多参数复合探测节点引入湿度参数的测量,通过检测湿度变化来克服高湿度结露引起的误报。开发了适于火灾监测的无线传感器网络多跳路由协议,建立了基于无线传感器网络的多参数火灾探测报警系统。监测系统中多个探测节点协同工作,采用多参数融合以及模糊神经网络

算法实现火灾判据,消除了环境高温、高湿度引起的误报。这种系统可以实现对重要场所烟雾、温湿度等火灾特征参数进行实时无线监控,与传统的检测系统相比,在古建筑保护、危险源监测方面有其独特的优势,特别适于不宜布线的特殊场所的消防工程,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 刘士兴,张永明,顾勤冬. 一种无线传感器网络火灾监测系统的设计与实现,传感器与微系统[J]. 2008,10(127):101-103.
- [2] 刘士兴,顾勤冬,张永明等. 古建筑火灾无线监测网络的研究,消防科学与技术[J]. 2008,4(27):258-260.
- [3] 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] Tia Gao, Dan Greenspan, Matt Welsh, et al. Vital Signs Monitoring and Patient Tracking Over a Wireless Network[C]//Proceedings of the 27th IEEE EMBS Annual International Conference, September 2005.
- [5] Shamim N. Pakzad, Kim Sukum, Gregory L. Fenves, et al. Multi-Purpose Wireless Accelerometers for Civil Infrastructure Monitoring[C]//Proceedings of the 5th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM 2005), Stanford, CA, and September 2005.
- [6] 顾勤冬. 基于无线传感器网络的火灾监测系统研制[D]. 合肥工业大学硕士论文,2009,3.
- [7] IEEE STD 802. 15. 4 - 2003. Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specification for Low Rate Wireless Personal Area Network[S]. IEEE Computer Society, 2003.
- [8] Texas Instrument. 2.4 GHz IEEE 802. 15. 4/ ZigBee-Ready RF Transceiver[DB/OE]. 2007-06-22. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>.
- [9] 吴龙标,方俊,谢启源. 火灾探测与信息处理[M]. 化学工业出版社,2006-08.
- [10] Cestari L A, Worrell C, Milke J A. Advanced fire Detection Algorithms Using Data from the Home Smoke Detector Project[J]. Fire Safety Journal, 40, P. 1-28, 2005.
- [11] 俞黎阳,王能,张卫. 无线传感器网络中基于神经网络的数据融合模型,计算机科学[J]. 2008,35(12):43-47.
- [12] 李光辉,赵军,王智. 基于无线传感器网络的森林火灾监测预警系统,传感技术学报[J]. CHINESE JOURNAL OF SENSORS AND ACTUATORS, 19(6): 2006



刘士兴(1969-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、可编程器件与系统设计、火灾探测及弱信号处理,Liusx@ustc.edu.