

文章编号:1004-9037(2014)05-0694-05

# 基于无线多传感器信息融合的火灾检测系统

李正周 方朝阳 顾园山 缪鹏飞 戴 真

(重庆大学通信工程学院,重庆,400044)

**摘要:**传统的火灾监控系统往往采用基于单传感器的有线信息检测与传输系统,布线不方便,环境适应性和抗干扰能力较差。本文提出了一种基于 ZigBee 无线多传感器网络的火灾监控系统,运用包括烟雾、温度、CO 气体等多传感器感知火燃烧状态,对是否发生火灾分配不同信任度函数,利用 D-S 证据理论融合 3 种传感器信息以判断火灾状态。本文详细阐述了系统工作原理、多传感器信息、D-S 证据理论等关键技术,并给出了多传感器响应燃烧实验的曲线图,理论分析和实验结果表明,该无线传感器火灾监测系统能更准确地检测火情,减少误报率,提高系统的可信度。

**关键词:**火灾检测;无线传感器网络;多传感器信息融合;D-S 证据

中图分类号:TN99

文献标志码:A

## Fire Detection System Based on Wireless Multi-Sensor Information Fusion

*Li Zhengzhou, Fang Chaoyang, Gu Yuanshan, Miao Pengfei, Dai Zhen*

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

**Abstract:** Traditional fire monitoring systems usually adopt single sensor to detect fire by wire transmission systems, and they have inconvenient wiring, low environmental adaptability and poor anti-interference ability. A fire detection system based on ZigBee wireless multi-sensor network is proposed with sensors including smoke, temperature and carbon monoxide gas sensor to detect combustion situation. The trust functions for smoke, temperature and carbon monoxide caused by fire are assigned according to fire situation, and the D-S evidence theory is utilized to integrate the three kinds of sensor information to determine whether fire happens or not. Multi-sensor combustion response experiments are conducted. Theoretical analysis and experimental results show that the fire detection system based on wireless multi-sensor can detect fire more accurately, reduce the false alarm rate and improve the credibility of the system.

**Key words:** fire detection; wireless sensor network; multi-sensor information fusion; D-S evidence

## 引 言

火灾是危害人们生命财产最为常见的一种灾害,如何有效地监控家庭火灾并杜绝灾害发生已成为家庭生活必须考虑的安全问题。传统的家庭火灾监测设备仅仅局限在家庭内部,人一旦离开监控区域,就难以获取监控信息而无法对险情采取及时、有效的处理措施。目前,基于 Internet 网络的

火灾监控系统往往采用分布式设计,此类火灾监控系统数传感单元和 workstation 采用有线方式连接,布线成本高、结构不灵活。

无线传感器网络广泛应用于山体滑坡、森林虫灾等灾害监控系统中,具有传输数据量少、传输延时小和功耗低等特点。无线传感器网络中的传感器节点可以随机分布于监测区域,以自组织方式构成无线网络系统<sup>[1-2]</sup>,能有效避免基于 Internet 网络的火灾监控等传统方案带来的布线成本高,破坏

家庭环境的缺点,并可实现对监测区域的多点连续测量。

在火灾发生的不同阶段,会产生不同的火灾特征信号。传统的火灾探测器往往是针对单一特征信号,单一参数火灾探测器对特征信号响应灵敏度不均匀,只能根据不同场所及该场所可能发生的火灾类型来选用探测器<sup>[3]</sup>。此外,单参数火灾探测器中采用的数据处理方式大多是阈值比较法,这种火灾检测简单且易于实现,但环境适应性和抗干扰能力较差。为了弥补以上缺陷,本文设计了多传感器来监测火灾发生不同阶段的特征信号,利用数据融合的方法对多种火灾监测数据进行综合判断<sup>[4]</sup>,减小多传感器数据之间的非关联性,提高家庭火灾监控的准确性。设计的火灾监控系统利用成熟的 Internet 和 ZigBee 技术,结合 Dempster-Shafer (D-S) 证据理论对多传感器数据进行融合<sup>[5-6]</sup>,火灾检测融合结果表明该系统可信度高,可扩展性强。

## 1 系统结构与原理

火灾检测系统包括传感器终端和智能网关两部分,其系统原理图如图 1 所示。火灾发生是一个伴有光、烟、温度、辐射和气体浓度变化的综合过程,如释放出 CO 气体,SO<sub>2</sub> 等多种成分气体,冒出气溶胶等烟雾,出现明火火焰和温度快速上升。终端节点配置了一氧化碳传感器 MQ-7,广谱气体传感器 MQ-2,温度传感器 DS18B20,分别感知 CO, SO<sub>2</sub>, 烟雾和温度,并采用 CC2430 处理器完成传感器数据采集、预处理和传输。

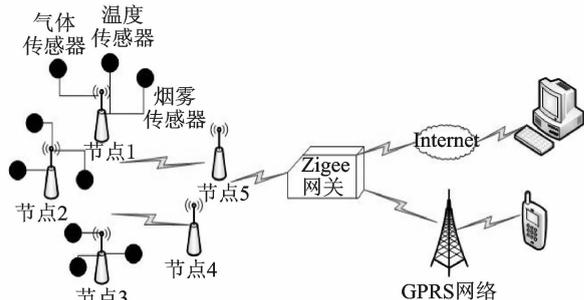


图 1 系统原理图

Fig.1 System schematic

根据传感器测量的距离范围,对家庭房间划分为多个监控区域,在每个区域都安装了传感器终端节点。传感器终端和智能网关之间采用 ZigBee 协议组建无线传感器网络进行无线通信,满足了多个火灾传感器终端节点组网通信传输信息的需求。

同时,家庭内部还安装了若干个路由节点进行数据交换,以增加传输距离和保证网络可靠性<sup>[7]</sup>。

网关担负着组织网路、处理多传感器数据和用户交互的任务,计算复杂度和密集度高。网关由 ARM11 处理器、射频收发模块 CC2430、电源及复位模块、触摸屏显示模块、摄像头、通用分组无线服务模块 (GTM900-C)、以太网接口 (DM9000AEP) 模块以及存储器模块组成。网关搭载嵌入式 Linux 系统作为网关部分的软件平台,在 ARM 嵌入式系统上移植 Boa 嵌入式 Web 服务器,以 SQLite 作为嵌入式数据库,应用 CGI 接口实现嵌入式 Web 服务器和用户浏览器之间的动态页面的交互。网关接收浏览器远程查询请求,实时显示当前传感器信息状况,融合多传感器数据决策火灾情况,并控制 GTM900-C 发送警报信息。摄像头用于视频监控,以使用户通过视频进一步确认火灾状态。

基于 ZigBee 无线传感器网络的火灾信息融合和检测的工作流程为:网关首先启动建立一个新网络;当网络建立成功之后,接受多个终端节点和路由节点入网请求,并分配短地址;网关启动监控指令,定时接收终端节点上多个传感器数据,并进行 D-S 证据信息融合和推理决策;其间,路由节点转发终端节点的信息。

## 2 多传感器信息融合

单传感器往往获取测量对象的某一属性信息,容易受环境其他因素干扰。火灾发生会产生光、烟、温度、辐射和气体浓度变化等特征信号,综合利用终端节点采集的 CO 浓度、温度和烟雾,决策判断是否发生了火灾及其状态,有利于提高火灾探测性能<sup>[8]</sup>。

运用 D-S 证据理论对 CO 浓度、温度和烟雾进行多传感器数据融合,依据各个信息表征火灾发生的信度函数,推理火灾是否发生<sup>[9]</sup>。火情有 3 种情况,分别为有火灾、无火灾、不确定,分别记为  $u_1$ ,  $u_2$  和  $u_3$ ,这 3 种情况是互斥的。火情的 3 种情况归为识别框架记为  $\Theta$ ,即  $\Theta = \{u_1, u_2, u_3\}$ 。如果函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  满足以下条件

$$m(\Phi) = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \quad (2)$$

则称  $m(A)$  为命题  $A$  的基本概率值或信任度,其中  $\Phi$  为空集。

根据传感器输出响应特性和专家知识,选择高斯函数作为烟雾、温度、CO 气体传感器输出表征火灾发生的信任度函数,分别如图 2~4 所示,其中横坐标为传感器输出值,纵坐标为火灾概率。信任度函数有 3 段,从左到右依次为无火灾、不确定、有火灾。当烟雾浓度大于 2 100 ppm(体积比),CO 输出大于 150 ppm 或者温度超过 65 °C,判定为有火灾,且信任度随传感器输出值增大而增加。

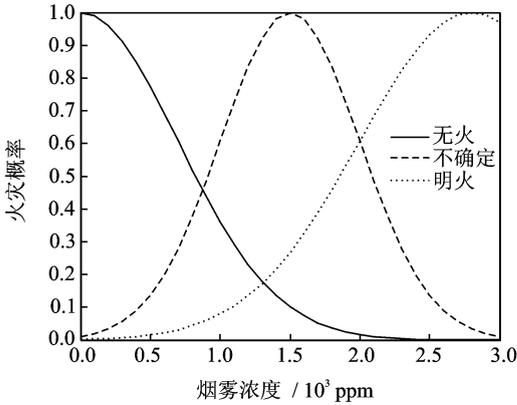


图 2 烟雾输出信任度曲线

Fig. 2 Trust curve of smoke output

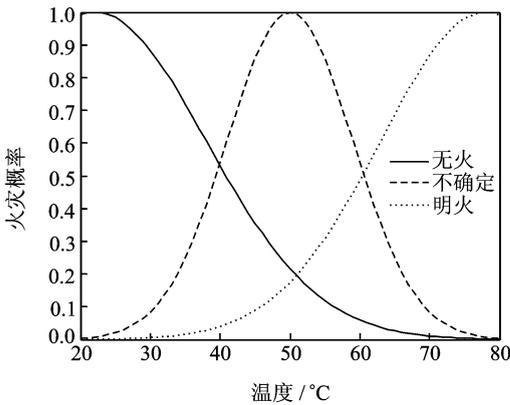


图 3 温度输出信任度曲线

Fig. 3 Trust curve of temperature output

在获取烟雾、温度和 CO 气体传感器输出后,可根据火灾发生的信任度函数获得当前火灾发生的信任度<sup>[10]</sup>,分别记为  $m_1 = \{A_1, A_2, A_3\}$ ,  $m_2 = \{B_1, B_2, B_3\}$  和  $m_3 = \{C_1, C_2, C_3\}$ ,其中  $A_1, A_2$  和  $A_3$  分别表示烟雾浓度判断有火、无火和不确定概率; $B_1, B_2$  和  $B_3$  分别表示温度判断有火、无火和不确定概率; $C_1, C_2$  和  $C_3$  分别表示 CO 气体判断有火、无火和不确定概率。

本文采取顺序方式融合 3 个传感器数据,即先融合烟雾和温度得到火灾发生信任函数,然后再将

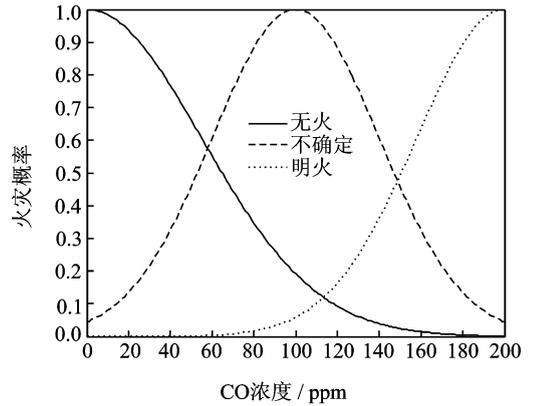


图 4 一氧化碳输出信任度曲线

Fig. 4 Trust curve of the output of CO

此信任函数与 CO 气体进行融合,融合的顺序不影响最终结果。根据 D-S 理论,融合的信任度函数为

$$m(A) = \sum_{A_i \cap B_j = A} \frac{m_1(A_i)m_2(B_j)}{1-k} \quad (3)$$

式中:

$$k = \sum_{A_i \cap B_j = \Phi, i=1, j=1}^{i=3, j=3} m_1(A_i)m_2(B_j) \quad (4)$$

表示完全冲突假设  $A_i$  和  $B_j$  所有信任度乘积之和,

且满足  $\sum_{A_i \cap B_j = \Phi, i=1, j=1}^{i=3, j=3} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1$ 。

由此得到烟雾、温度和一氧化碳气体对火情的有火、无火和不确定概率,进而判断火灾是否发生。

### 3 试验结果及分析

试验房间大小为 3 m × 3 m × 2.4 m,燃烧气体为天然气,天然气燃烧器置放在房间一侧的中间,终端节点安放在房间正中顶部。一氧化碳浓度、温度和烟雾浓度传感器每隔 20 s 测量一次数据。经过多次相同天然气燃烧试验,拟合出温度、一氧化碳浓度和烟雾浓度传感器输出响应和时间的曲线图,分别如图 5~7 所示。

火焰产生导致温度在 120 s 时间内升高到近 80 °C,然后维持稳定;烟雾浓度达到峰值 3 000 ppm 后有所减少;CO 浓度在燃烧初期增长较快,最终达到 200 ppm。由于燃烧前期未充分燃烧,烟雾和 CO 浓度快速增长,一旦阴燃火发展成明火后,烟雾颗粒会和 CO 气体会随着燃烧过程而下降或趋于稳定。

终端节点将获取到的 CO、温度、烟雾数值无

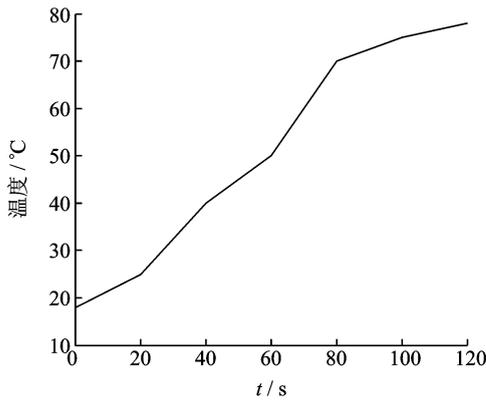


图 5 温度-时间曲线图

Fig. 5 Temperature-time curve

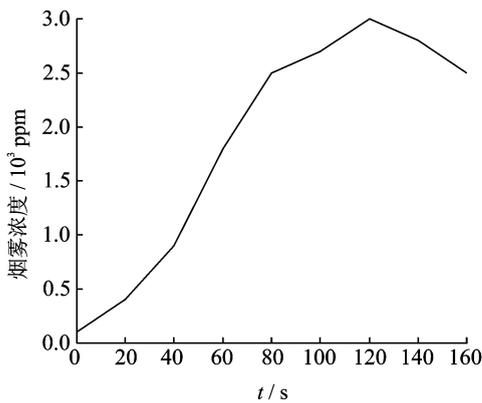


图 6 烟雾浓度-时间曲线图

Fig. 6 Smoke concentration-time curve

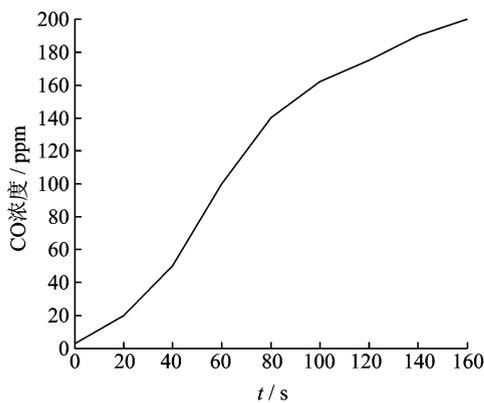


图 7 CO 浓度-时间曲线图

Fig. 7 CO concentration-time curve

线传输到智能网关,智能网关根据具体数值计算和信任度函数获得到各种成分的火灾发生概率,根据设定的阈值判断火灾是否发生,如表 1 所示。温度值判断火情发生;烟雾浓度值判断火情发生;CO 却无法确定火情。由此可见,单一性质的传感器难以准确判定火灾是否发生,具有较大的不确定性。

表 1 多传感器火灾概率分配

Table 1 Fire probability distribution of multi-sensor

| 传感器      | 火灾概率 $m(u_1)$ | 无火灾概率 $m(u_2)$ | 不确定概率 $m(u_3)$ | 火灾情况 |
|----------|---------------|----------------|----------------|------|
| 温度 $m_1$ | 0.7           | 0.1            | 0.2            | 是    |
| CO $m_2$ | 0.4           | 0.1            | 0.5            | 不定   |
| 烟雾 $m_3$ | 0.5           | 0.2            | 0.3            | 是    |

对 3 个传感器获取到 CO、温度、烟雾数值按照 D-S 证据理论进行信息融合,其结果如表 2 所示。数据表明,对存在火灾的判定概率由单传感器最大值 0.7 提高到 0.873,并且将不确定概率降低至 0.042,克服了温度和烟雾传感器判断火灾发生而一氧化碳气体传感器无法确认火灾发生的缺陷,消除了多传感器数据之间矛盾,大大提高判断的准确性。

表 2 多传感器火灾分配及融合

Table 2 Fire distribution and fusion of multi-sensor

| 传感器      | 火灾概率 $m(u_1)$ | 无火灾概率 $m(u_2)$ | 不确定概率 $m(u_3)$ | 火灾情况 |
|----------|---------------|----------------|----------------|------|
| 温度 $m_1$ | 0.700         | 0.100          | 0.200          | 是    |
| CO $m_2$ | 0.400         | 0.100          | 0.500          | 不定   |
| 烟雾 $m_3$ | 0.500         | 0.200          | 0.100          | 是    |
| 融合 $m$   | 0.873         | 0.085          | 0.042          | 是    |

## 4 结束语

本文提出的无线多传感器信息融合的火灾检测系统,利用 D-S 证据理论融合多传感器信息,较单一传感器能更为全面感知火灾状态,更为准确地检测是否出现火情,减少误报率,提高系统的可信度。同时,ZigBee 无线网络的灵活性,使得该系统可以任意扩展监控节点数量和位置,系统灵活、可扩展性强,扩充火灾系统监控能力。

### 参考文献:

[1] 尚盈,袁慎芳,吴键,等.基于无线传感器网络的大型结构健康监测系统[J].数据采集与处理,2009,24(2):254-258.  
Shang Ying, Yuan Shenfang, Wu Jian, et al. Large-scale structural health monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 24(2): 254-258.

[2] 于宏毅,李欧,张效义.无线传感器网络理论与实现[M].北京:国防工业出版社,2008:1-15.  
Yu Hongyi, Li Ou, Zhang Xiaoyi. Wireless sensor network theory, technique and implementation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 1-15.

[3] 阎晓玲,王黎明,卜乐平.基于多维彩色向量空间的火

- 焰图像模糊聚类分割算法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(3): 368-371.
- Yan Xiaoling, Wang Liming, Bu Leping. Fuzzy clustering segmentation algorithm of flame image based on multi-dimensional color vector space[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(3): 368-371.
- [4] 荣健, 乔文钊. 基于模糊神经系统的多传感器数据融合算法[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(3): 376-378.
- Rong Jian, Qiao Wenzhao. Neural-fuzzy-based multi-sensor data fusion architecture[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(3): 376-378.
- [5] 林岳松, 陈琳, 郭宝峰. 基于数据驱动的信息融合及其在车辆声辨识中的应用[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2158-2161.
- Lin Yuesong, Chen Lin, Guo Baofeng. A data-driven fusion and its application to acoustic vehicle classification[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(9): 2158-2161.
- [6] 任明秋, 蔡金燕, 朱元清, 等. 基于证据融合的雷达抗干扰性能多指标综合评估[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2336-2340.
- Ren Mingqiu, Cai Jinyan, Zhu Yuanqing, et al. Multi-index synthesis evaluation for radar ECCM capability based on evidence fusion theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2336-2340.
- [7] 李战明, 李泉, 殷培峰. 基于 ZigBee 的环境监测无线传感器网络节点设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(6): 118-122.
- Li Zhanming, Li Quan, Yin Peifeng. Design of wireless sensor network nodes based on ZigBee technology in environmental monitoring[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(6): 118-122.
- [8] Zervas E, Mpimpoudis A, Anagnostopoulos C, et al. Multisensor data fusion for fire detection[J]. Information Fusion, 2011(12): 150-159.
- [9] 万建平, 彭天强, 李弼程. 基于证据理论的视频语义概念检测[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(5): 536-540.
- Wan Jianping, Peng Tianqiang, Li Bicheng. Video semantic concept detection based on evidence theory[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 26(5): 536-540.
- [10] Wang Yan, Yu Chunyu, Zhang Yongming. Fire detection model in tibet based on gray-fuzzy neural network algorithm[J]. Expert Systems with Application, 2011, 38: 9580-9586.

**作者简介:**李正周(1974-),男,博士,教授,研究方向:雷达信号处理、目标识别与跟踪, E-mail: lizhengzhou@cqu.edu.cn; 方朝阳(1986-),男,硕士研究生,研究方向:信号处理、无线传感器网络; 顾园山(1989-),男,硕士研究生,研究方向:嵌入式系统开发; 缪鹏飞(1987-),男,硕士研究生,研究方向:嵌入式系统开发; 戴真(1991-),男,硕士研究生,研究方向:信号处理。

