

文章编号: 1009-6094(2015)01-0111-07

基于多传感器融合的林火监测*

丘启敏, 郑嫦娥, 田野, 刘晋浩, 傅天驹
(北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了提高近距离火灾监测的准确率, 建立了基于 Arduino 平台的多传感器实时监测系统。此系统安装在移动机器人身上以探测火灾。在林火发生期间, 会产生 CO、CO₂、明火火焰及其他产物, 并引起周围环境温度的升高。因此, 选择合适的传感器, 检测出以上参数, 就有可能据此判断实际环境是否有火。通过在 Arduino 上搭建火焰传感器、温度传感器、气体传感器和烟雾传感器, 可以实时监测环境参数。在无火和有火环境中进行了多次试验, 进行数据采集, 得到了大量原始数据。无火环境的数据是在不同的天气条件下测得的; 有火环境由试验火堆模拟得到。在模拟的过程中, 进行人为操作以模拟不同的火情。如通过浇灌底部的可燃物模拟预热阶段, 试验数据因此更有代表性。数据分析表明, 单个传感器的输出值波动大, 且在在有火环境和无火环境中的输出值有重叠。因此, 用单一传感器来检测火灾的准确率很低。而同时分析 3 个传感器的输出值时, 其输出值随所检测火堆的不同呈现出一致的变化规律。最后, 利用神经网络进行多传感器数据融合。涉及 5 个输入变量, 由神经网络实现对多变量的非线性问题进行模式识别。将前述试验所得数据划分为训练数据和测试数据, 两类数据均包含一定比例的有火样本和无火样本。用训练数据对 BP 神经网络进行训练, 可得到林火识别模型。用测试数据检验模型, 结果表明, 该 BP 神经网络对试验火的识别准确率为 98.625%。

关键词: 安全工程; 林火监测; 多传感器; BP 神经网络; 数据融合
中图分类号: X43 **文献标识码:** A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.01.023

0 引言

森林是人类的宝贵财富, 然而森林火灾常对森林资源造成致命的破坏^[1]。为此, 许多国家对林火进行了大量的研究^[2-7], 其中重要的一方面就是林火的预防和早期林火的检测。“预防重于扑救”, 只有防患于未然, 才能使林火对森林资源的破坏达到最小。

在林火发生前或开始时就能检测出来, 一直是林火研究者的目标。早期林火的检测就是利用各种技术手段在林火发生前或开始时就及时地检测出并报警。目前主要依靠以下一些方法。

利用红外技术探测林火已经有几十年的历史, 目前已相对成熟。各种红外热像仪的问世为火灾探测提供了可能。如意大利研制出一种森林火灾的红外线探测仪^[8], 即可对周围 120 km 半径范围内进行扫描, 如发现某处红外线增强, 即可发出警报, 提醒人们进行检查并判断出可能的火源点。红外检测方法精度高, 但是技术复杂, 成本高昂。

* 收稿日期: 2014-08-06

作者简介: 丘启敏, 硕士研究生, 从事林火识别研究; 郑嫦娥(通信作者), 副教授, 从事林火识别和机器人技术研究, zhengchange@gmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31200544); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(YX2013-14); 高等学校博士学科点专项科研项目(20110014120012)

卫星遥感技术也可应用于林火探测。目前, 比较常用的卫星就是 NOAA 极轨气象卫星^[9]。用卫星监测价格低廉, 监测范围广, 但存在较高的误报率^[10], 且只能较准确地监测公顷级的林火。并且周期相对较长, 如 NOAA 气象卫星上的 AVHRR(高级甚高分辨率辐射仪)对同一地区的覆盖率为一天 4 次。

用视频图像探测林火也是目前的研究热点之一^[11]。视频图像技术对图像质量要求高, 特别是在夜间的时候, 弱可见光更使得成像质量难以保证, 并且当气候条件不好时, 此方法也大受限制^[12]。目前林火图像识别算法的研究也是视频图像技术研究的重要方面^[13-14]。

利用无线传感器网络技术进行林火监测也是林火监测的研究热点之一。此技术的研究主要集中在节点传感器的设计、节点的布置、降低能耗等方面^[15]。由于功耗和体积的限制, 利用无线传感器网络进行林火研究一般只是对温度、湿度进行监测^[16]。

本文提出的多传感器的林火监测方法可应用于移动机器人身上。移动机器人能深入火灾现场并通过位置的变化以扩大监测范围, 已有研究人员将移动机器人用于林火的研究^[17-18]。

利用多判据的火灾探测方法近年来开始兴起, 并已成为火灾探测领域的热门研究方向。此种方法克服了利用单一的参数探测火灾时存在的响应灵敏度低和误报率高的特点。即使多个判据中的信息存在着一定的不确定性、矛盾或错误成分, 利用某种算法将各种信息综合起来进行分析, 将明显提高灵敏度和准确性^[19]。韩菁^[20]利用专家数据库中的 CO、温度等数据, 并采用神经网络进行数据融合分析, 可对林火进行达到一定准确度的识别, 但其结果的准确性很大程度上取决于经验数据库中的数据质量和数量, 并未对实际的林火环境进行检测, 因此, 数据的准确性和针对性均有待提高。

针对单传感器探测火灾误报率高的问题, 本文在试验基础上进行多传感器林火监测的研究。为使移动机器人能准确检测并判别周围环境是否有火, 设计基于多传感器的实时数据采集系统, 并且通过实际的点火试验搜集各传感器数据, 用神经网络进行数据融合及分析, 达到林火识别的目的。

1 监测系统硬件设计

火的基本特征主要有火焰、燃烧产物和燃烧音^[21-22], 选择火焰及燃烧产物作为着火时的特征属性, 通过构建检测硬件采集相关数据, 分析有火和无火时的特征属性来实现林火监测。

1.1 传感器的选择

使用火焰传感器模块及 MQ2、MQ7、MQ9 3 种气体传感器模块和温度传感器模块。

火焰传感器模块由紫外光敏管 R2868 和配套电路板 C3704 组成。该模块可不受自然光的影响, 只对火焰有反应。此模块灵敏度很高, 能在 5 m 或更大的范围内探测出 25 mm 高的火焰。其输出可接控制器的模拟输入口, 火焰越大, 输出的方波频率越高。

气体传感器模块包括 MQ2、MQ7 和 MQ9。MQ2 为烟雾、甲烷检测传感器模块, MQ7 为一氧化碳检测传感器模块,

MQ9 为一氧化碳、可燃气体检测传感器模块。此 3 种传感器的功能有部分重叠,但由于每种传感器对火灾都分别有响应,同时价格低廉,为了提高监测系统的容错性,将此 3 种传感器都应用于监测系统。它们都可进行模拟量输出,输出模拟值越大,表明检测对象的浓度越大。

温度传感器模块的应用也是火灾探测的有效手段之一。火灾发生过程会产生大量的热,因此,必然会造成周围环境温度的升高。本文采用 NTC 热敏电阻传感器,它的灵敏度高,温度检测范围为 $0 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。利用温度传感器的输出模拟值检测环境温度。

1.2 控制器的选择

Arduino 是一种开源硬件平台^[23],具有丰富的软硬件接口,利于编程及扩展其他模块,适合本文的使用要求。

Arduino 有多种不同的版本,本文使用的 Arduino MEGA 是增强型 Arduino 控制器^[24],基于 Processing IDE 语言开发,在编程上摆脱了单片机复杂的位操作。其简单的开发方式节约了学习成本,缩短了开发周期。

1.3 监测系统实物图

图 1 为硬件系统图,主要包括 Arduino 控制板、火焰传感器模块、温度传感器模块和 MQ2、MQ7、MQ9 模块,连接跳线若干。

2 试验过程及结果分析

试验数据的真实性和代表性是影响试验结果的关键。为了进行后续的数据处理,此试验需要大量的数据。需要采集无火时的环境参数与有火时的环境参数。如图 1 所示,数据是通过监测系统与计算机进行串口通信进行记录的。在试验中,每 10 s 采集一组数据,每组数据包含 5 个参数,分别为火焰传感器输出、温度传感器输出和 MQ2、MQ7、MQ9 模块的输出。其中,无火的环境参数从两次室内环境和两次室外环境采集得到,有火的环境参数选自其中 3 次点火试验。

2.1 无火环境下的传感器输出

以下分析所用的无火环境下的数据来源于 2014 年 4 月 22 日和 5 月 25 日的工学院实验楼及 5 月 15 日和 6 月 1 日的室外环境实测,从各次试验所得数据中随机选出 1 500 组数据进行分析,得到各传感器在无火环境中的输出结果。

如图 2 所示,火焰传感器输出稳定,在无火环境下输出的方波数都为 0。

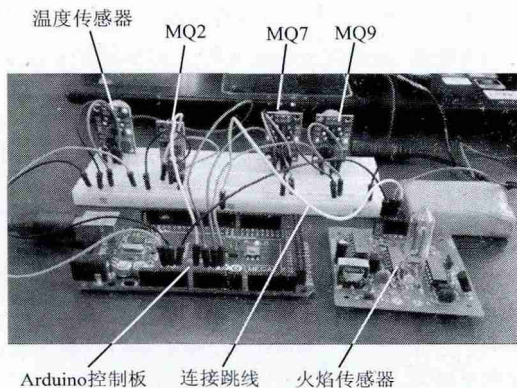


图 1 监测系统图

Fig.1 Image of the monitoring system

如图 3 所示, MQ2 模块的输出范围为 143 ~ 581,均值为 376。

如图 4 所示, MQ7 模块的输出范围为 136 ~ 475,均值为 276。

如图 5 所示, MQ9 模块的输出范围为 304 ~ 652,均值为 550。

如图 6 所示,温度传感器模块的输出范围为 275 ~ 396,均值为 306。

由图 2 ~ 6 可知,即使是在无火的环境中,各传感器的波动幅度都较大。因此,根据某一单一传感器很难判别是否有火灾发生。应该综合多个传感器的输出进行判断,以增加判

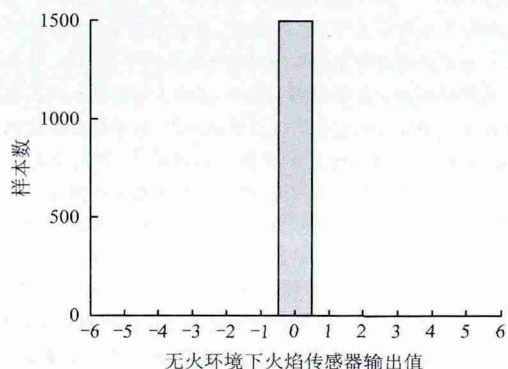


图 2 无火环境下火焰传感器输出值

Fig.2 Output of the flame sensor on fireless conditions

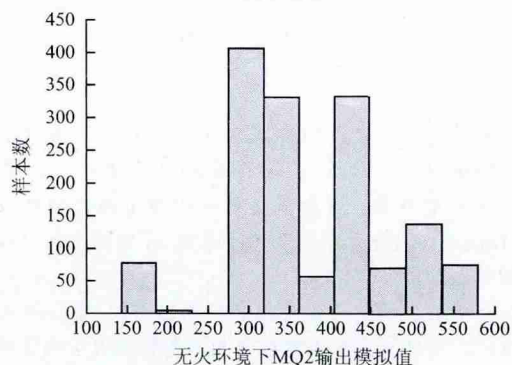


图 3 无火环境下 MQ2 模块输出值

Fig.3 Output of the MQ2 module on fireless conditions

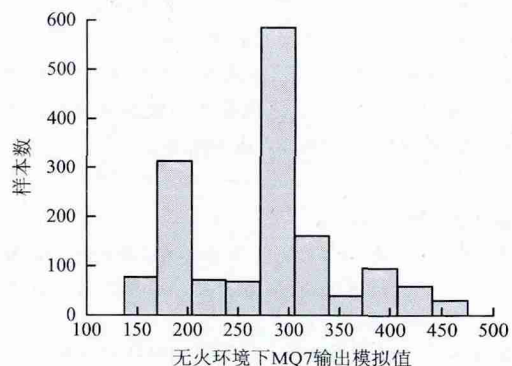


图 4 无火环境下 MQ7 模块输出值

Fig.4 Output of the MQ7 module on fireless conditions

断的准确性。其中, 传感器模块 MQ2、MQ7 和 MQ9 因试验条件的限制, 无法进行标定, 只能定性分析。当环境中存在一氧化碳或可燃气体等检测对象时, 气体传感器输出是增大的, 此 3 种传感器的输出越大, 表明火灾发生的可能性就越大。

下面标定温度传感器。由于温度传感器并未直接接触火焰, 其数据是热敏电阻附近的空气温度。因此, 其值不会过高, 当温度超过某一值且值越大时, 可认为火灾发生的可能性越大。

已知此传感器的模拟输出值和环境温度值为线性关系。在同一时刻, 读出传感器的模拟输出值(x) 和另一温度计读数(y), 选取以下 4 组试验数据: (245, 37.6), (280, 33.2), (306, 28), (342, 23.8)。用 MATLAB 进行曲线拟合, 得到图 7。

拟合关系为: $y = -0.1461x + 73.5$ 。 y 为实际温度值, x 为传感器的输出模拟值。由标定结果知, 因所测季节的关系, 无火环境下温度为 15.6 ~ 37.6 °C。为使试验数据具有代表性, 以后可做改进, 在更大的温度范围内进行标定试验。

2.2 有火环境下的传感器输出

为了采集林火环境下的环境参数, 共进行了 4 次点火试验。时间分别为 2014 年 4 月 14 日、4 月 18 日、5 月 15 日和 6 月 1 日, 共选出 1 000 组数据作为有火环境的样本。

如图 8 所示, 在 4 月 18 日试验过程中, 改变检测距离以判定监测系统的检测范围, 分别为 150 cm、120 cm、80 cm、60 cm 和 20 cm。结果表明, 因试验在校园进行, 出于安全考虑, 火堆较小, 且周围环境通风好, 只有在 80 cm 以内, 各传感器

数值才有比较明显的变化。此装置是应用于移动机器人之上的检测系统, 以实现近距离内火灾情况的准确判定, 通过机器人移动可以扩大其监测范围。而且, 在实际林火火场中, 一般火势风势都较大, 火焰及烟雾等产物均很大, 各传感器所能检测到的值将显著增大, 此时检测距离并不受限于此试验所得的结果。

林火的燃烧大体可分为 3 个阶段^[25], 分别为预热阶段、气体燃烧阶段和固体燃烧阶段。在预热阶段中, 可燃物由于受到外界热源作用开始增温, 但速度非常缓慢。随后, 水分蒸发, 可燃物逐渐干燥并发生局部分解, 产生大量的水蒸气。由于水分蒸发消耗热量, 使温度上升缓慢, 并且氧化迟缓。随着水蒸气的蒸发, 产生大量的烟。因此, 在预热阶段, 识别林火的关键参数为烟。为模拟出预热阶段, 在试验过程中给火堆上层部分的可燃物加水淋湿, 点燃下层树枝, 上层的树枝由下层逐渐加热增温就类似于预热阶段, 见图 9。

如图 9 所示, 产生了大量的烟, 此时烟雾传感器 MQ2 数值明显增大。

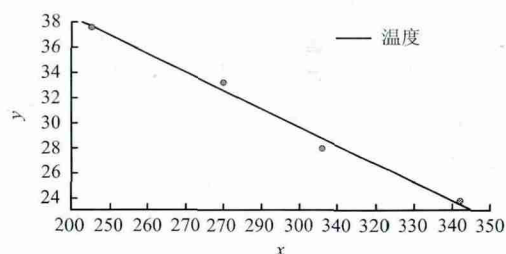


图 7 温度传感器模块的标定

Fig. 7 Calibration of the temperature sensor module

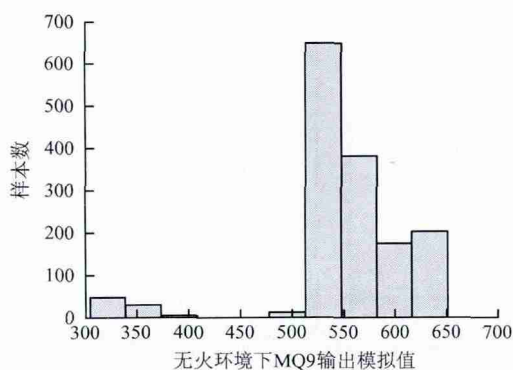


图 5 无火环境下 MQ9 模块输出值

Fig. 5 Output of the MQ9 module on fireless conditions

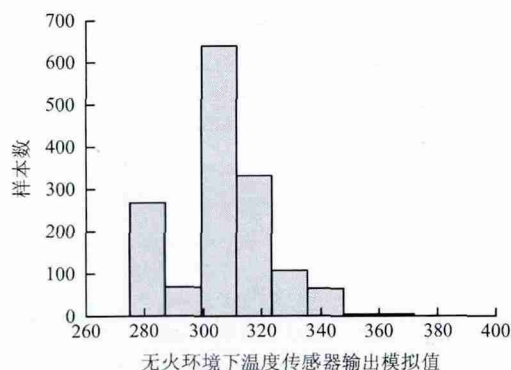


图 6 无火环境下温度传感器模块输出值

Fig. 6 Output of the temperature sensor module on fireless conditions

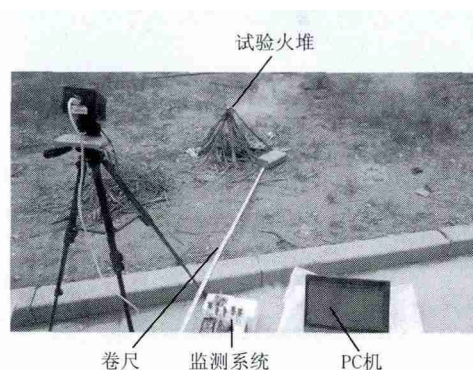


图 8 改变监测系统距离的点火试验

Fig. 8 Ignition experiment of changing the distance of the monitoring system



图 9 模拟林火燃烧的预热阶段

Fig. 9 Pre-heating period of the simulated forest fire

在第二阶段的气体燃烧阶段中,随着温度继续上升,可燃物被迅速分解成可燃性气体和焦油液滴,形成可燃性挥发物。这些可燃性挥发物与空气接触形成可燃性混合物。此阶段之后,一般紧跟着固体燃烧阶段,表现为产生火焰,并放出大量热量。可把这两个阶段看做剧烈燃烧阶段(图10)。

图11~15分别为各传感器在有火环境中的输出。

有火时,火焰传感器的输出范围见图11。由图11可知,在有火环境中,火焰传感器的输出脉冲极限值为12个/10s,输出脉冲均值为3.65个/10s。火焰传感器的输出脉冲数值随火焰强度而变化。当火焰传感器的输出为0时,可能是阴燃阶段,此时没有明火,只能靠燃烧产物和温度来进行判断。

在有火环境中,MQ2模块的输出见图12。由图12可知,在有火环境中,MQ2的输出范围为422~701,其分布范围相当广,不少数据均和无火时的输出重叠,因此,仅靠1个传感器不可能达到探测林火的目的。其均值为502,比无火时的均值376大。

在有火环境中,MQ7模块的输出范围见图13。分析类似于对MQ2的分析,其输出范围为174~500,均值为295,比无火时的均值276大。

在有火环境中,MQ9模块的输出范围见图14。分析同上,其输出范围为419~684,均值为584,比无火时的均值550大。

在有火环境中,温度传感器模块的输出范围见图15。温度传感器所测温度值实际上为探头附近的空气温度,因此温

度传感器输出的温度不会过高。其输出范围为200~355,代入2.1节温度传感器的标定公式知,在试验条件下,温度传感器所处环境中最高温度已达到44.3℃。

总结各传感器在有火和无火环境中的输出范围和均值,见表1。从表1可以看出,在无火与有火环境时,温度、气体、烟雾传感器的输出值重合度较高。因此,除火焰传感器的误报率较低外,如果单独采用温度、气体、烟雾等传感器,误判率均较高。

3 基于BP网络的数据融合

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)通常简称为

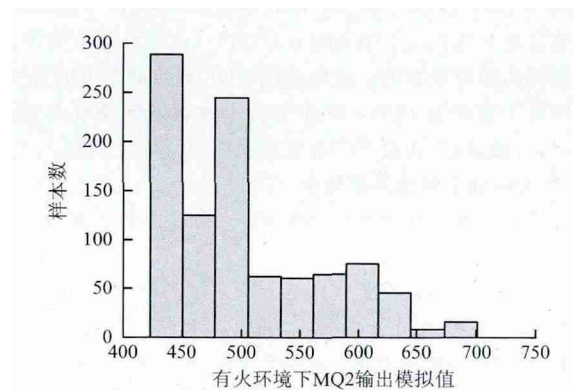


图12 有火环境下MQ2模块输出值

Fig. 12 Output of the MQ2 module under fire conditions

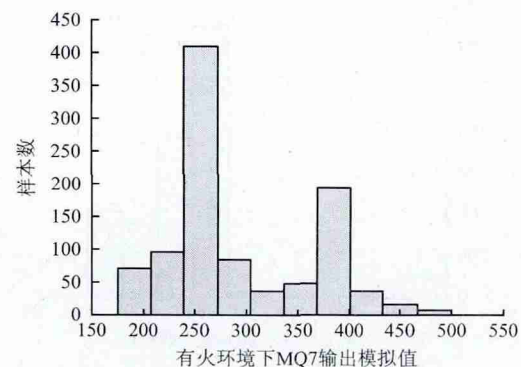


图13 有火环境下MQ7模块输出值

Fig. 13 Output of the MQ7 module under fire conditions

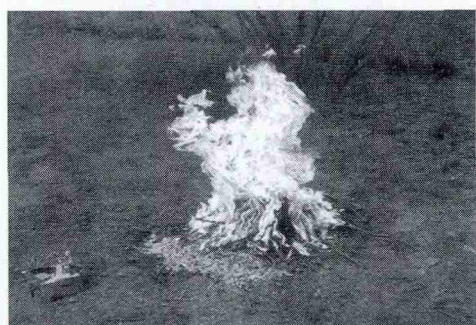


图10 剧烈燃烧阶段

Fig. 10 Intense combustion of fire

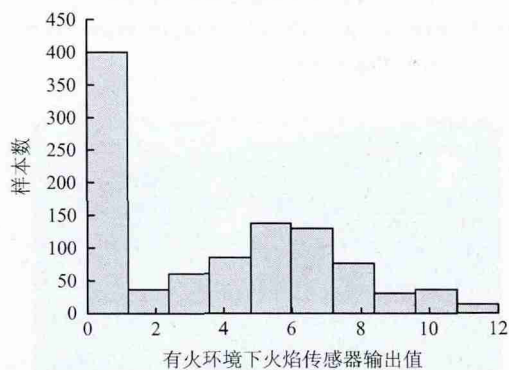


图11 有火环境下火焰传感器的输出

Fig. 11 Output of the flame sensor under fire conditions

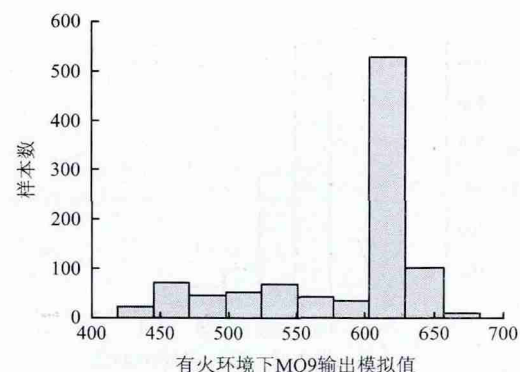


图14 有火环境下MQ9模块输出值

Fig. 14 Output of the MQ9 module under fire conditions

神经网络, 是一种在生物神经网络的启示下建立的数据处理模型。神经网络在许多领域发挥着重要作用, 可应用于模式识别、人工智能、深度学习、控制工程、优化计算和联想记忆、信号处理等方面^[26]。

BP 神经网络是前向神经网络的核心部分, 也是整个人工神经网络体系中的精华^[27], 广泛应用于分类识别、逼近、回归、压缩等领域。在实际应用中, 约 80% 的神经网络模型采取了 BP 网络或 BP 网络的变化形式。多传感器数据融合建模的过程就是建立神经网络模型的过程: 首先, 选择合适的 BP 网络结构; 其次, 将采集到的数据划分为训练样本和测试样本; 然后, 调用神经网络工具箱函数进行 BP 网络的创建和训练; 最后, 对测试数据进行测试, 根据测试结果的准确率, 对网络部分参数进行调整。本文所用 BP 网络结构见图 16。

由图 16 可见, 该网络共有输入层、隐含层和输出层 3 层。其中, 输入层节点数取决于输入向量的维数。在此 BP 网络中, 有 5 个输入节点, 分别代表火焰传感器的输入、温度传感器的输入和 MQ2、MQ7、MQ9 模块的输入。隐含层节点数对 BP 网络的性能有很大影响, 结合本文所分析的数据量, 将隐含层节点数设置为 3。输出层只有 1 个节点, 是神经网络的输出。在本文中, 设计 BP 网络为二值输出, 分别为 0 和 1, 且用 0 代表无火, 1 代表有火。

BP 网络在使用前需要进行数据类别的划分, 将前述试验所得数据划分为如下 4 类: 训练样本、训练样本标签(设定为 0 或 1, 无火样本标签为 0, 有火样本标签为 1)、测试样本、测试样本标签(标签设定规则同测试样本)。如表 2 所示, 样本数据为随机选取试验过程中的数据, 因试验过程模拟了火焰燃烧的多个阶段及多种状态, 此样本数据对于实际火灾具有一定的代表性。

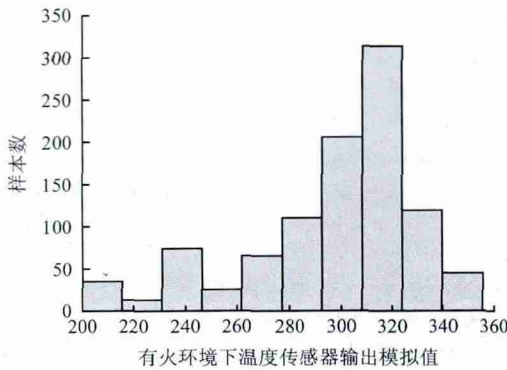


图 15 有火环境下温度传感器输出值
Fig. 15 Output of the temperature sensor module on fire conditions

表 1 各传感器输出范围及均值

	无火环境中		有火环境中	
	的输出范围	的输出均值	的输出范围	的输出均值
火焰传感器	0	0	0 ~ 12	3. 65
温度传感器	275 ~ 396	306	200 ~ 355	297
MQ2	143 ~ 581	376	422 ~ 701	502
MQ7	136 ~ 475	276	174 ~ 500	295
MQ9	304 ~ 652	550	419 ~ 684	584

调用 BP 神经网络的创建函数 feedforwardnet(3) 创建隐含层为 3 层的 BP 网络。在训练阶段, 将划分好的 1 000 组无火样本数据和 700 组有火样本数据输入神经网络中进行训练, 经过训练后的 BP 网络便能应用于本文的模式识别。在测试阶段, 将 500 组的无火样本和 300 组的有火样本输入此网络中进行测试。测试结果由程序得出, 模型判断准确率公式为: 对测试数据准确判断的数目/测试样本总数 $\times 100\%$ 。由公式计算可得, 神经网络对测试数据进行模式识别(0 或 1) 的准确率为 98. 625%。本文中神经网络的训练结果见图 17。

由图 17 可知, 创建模型的时间为 6 s, 迭代次数为 54, 均方误差为 0. 021 8。此模型能达到极高的识别准确率, 表明基于移动机器人的多传感器监测系统可应用于近距离的林火探测, 并可由神经网络模型快速判别是否有林火。

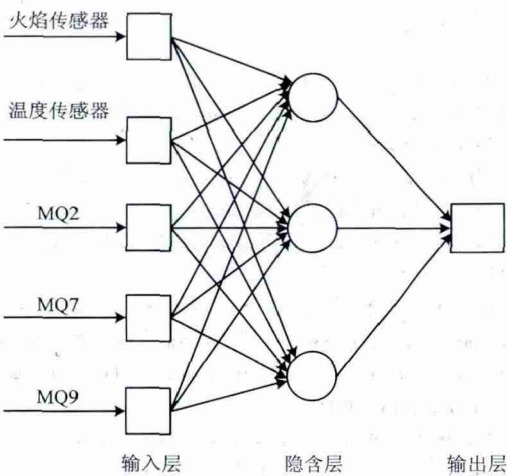


图 16 BP 网络结构图
Fig. 16 Structure of the BP network

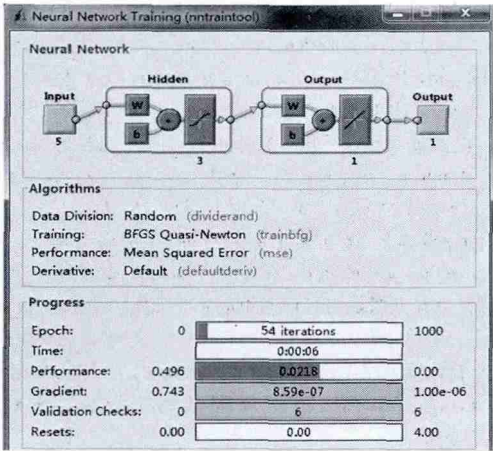


图 17 BP 网络训练结果图
Fig. 17 Training results picture of the BP network

表 2 数据划分结果

Table 2 Results of divided data				
样本类型	训练样本数	测试样本数	样本总数	标签
无火样本	1 000	500	1 500	0
有火样本	700	300	1 000	1

4 结 论

本文利用多传感器采集和分析林火数据,得到火灾判别模型。硬件平台选用 Arduino 控制板,采用火焰传感器、温度传感器、气体传感器和烟雾传感器共同检测环境参数。进行了不同环境下无火时的数据采集,并进行了4次点火试验。以大量试验所得的数据为样本,采用BP神经网络对各传感器数据进行融合分析。将测试样本输入训练后的BP神经网络,由程序运行结果可得,此BP神经网络进行林火识别的准确率为98.625%。多传感器的协同工作保证了对林火各阶段的不同产物均能检测,且有效消除了单一传感器检测时的误差,并由神经网络对大量数据进行模式识别,这是监测准确率高的主要原因。因此,试验证明,该方法能有效地判断出所检测环境是否有火。

References(参考文献):

- [1] LIN Qizhao(林其钊), SHU Lifu(舒立福). *Introduction to forest fire*(林火概论) [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2003: 1-2.
- [2] FEDERICO A, PATRIZIA B, KLAUS S. A low-cost microwave radiometer for the detection of fire in forest environments [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2632-2643.
- [3] TURGAY, HÜSEYİN Ö, HASAN D. Fire and smoke detection without sensors: image processing based approach [C]//*Proc of the 15th European Signal Processing Conference*. Poznan: European Signal Processing Conference, 2007: 3-7.
- [4] KREMENS R, FAULRING J, GALLAGHER A. Autonomous field-deployable wildland fire sensors [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2012, 21: 938-949.
- [5] PRINCEPAL B, ARSHDEEP G. *Early forest fire detection system* [D]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2014.
- [6] WU Xueqiong(吴雪琼), QIN Xianlin(覃先林), LI Cheng(李程), et al. Analysis of current forest fire monitoring system in China [J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*(内蒙古林业调查设计), 2010, 33(3): 69-72.
- [7] SHU Lifu(舒立福), TIAN Xiaorui(田晓瑞), KOU Xiaojun(寇晓军). The focus and progress on forest fire research [J]. *World Forestry Research*(世界林业研究), 2003, 16(3): 37-40.
- [8] YE Bing(叶兵). *The present situation and development tendency of domestic and abroad technical level of forest fire prevention*(国内外森林防火技术及其发展趋势) [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2000.
- [9] KAZI A K, HARAMOTO Y. *A new approach for more effective fire detection method using NOAA AVHRR images* [D]. Sendai: Tohoku University, 2005.
- [10] ZHANG Shixiang(张仕响), WU Gang(武刚). The application of information technology in forest fire detection [J]. *China Management Informationization*(中国管理信息化), 2009, 12(21): 114-117.
- [11] ZHANG Jian(张健). *Research on technology and methods for forest fire video monitoring*(林火视频监控新技术研究) [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [12] SUN Wei(孙伟), CAO Shanshan(曹姗姗), TANG Xiaoming(唐小明). Spatial optimum arrangement and evaluation technology of forest fire video monitoring [J]. *Journal of Natural Disasters*(自然灾害学报), 2013, 22(2): 61-69.
- [13] ZHANG Jian(张健). Study of the localization algorithm for forest fire based on video monitoring system [J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2009, 9(1): 127-130.
- [14] LIN Hong(林宏). Improved algorithm for smoking identification of the forest fire based on the video survey [J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2013, 13(2): 210-214.
- [15] HUANG Guanghua(黄光华). *Design and research on forest fire monitoring system based on wireless sensor network*(基于无线传感器网络的森林火灾监测系统的设计与研究) [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2012.
- [16] XIAO Di(肖迪). *Intelligent forest fire real-time monitoring system based on wireless sensor networks*(基于无线传感网络的智能森林火灾实时监控系) [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [17] JIANG Shuhai(姜树海). Development status of forestry robot [J]. *Journal of Northeast Forestry University*(东北林业大学学报), 2009, 37(12): 95-97.
- [18] SUN Jiayan(孙嘉燕), WANG Nanding(王南丁), WANG Shuyang(王述洋). Design of crawler remote-control fire-fighting robot and climbing theoretical analysis [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*(安徽农业科学), 2013, 41(26): 10879-10881.
- [19] LI Xiaoyu(李小昱), WANG Wei(王为), LEI Tingwu(雷廷武), et al. Prospects of the application of multisensor information fusion techniques in agricultural engineering [J]. *Transactions of the China Society of Agricultural Engineering*(农业工程学报), 2003, 19(3): 10-13.
- [20] HAN Jing(韩菁). *Research on fire detection based on multi-sensors data fusion technology*(多传感器数据融合技术在火灾探测中的应用研究) [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2011.
- [21] CHENG Xiaofang(程晓舫), WANG Ruifang(王瑞芳), ZHANG Weinong(张维农), et al. Principle and method for fire detection [J]. *China Safety Science Journal*(中国安全科学学报), 1999, 9(1): 24-29.
- [22] COFRER W R, WINSTEAD E L, STOCKS B J. Crown fire emissions of CO₂, CO, H₂O, and TNMHC from a dense jack pine boreal forest fire [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 3919-3922.
- [23] BANZI M. *Getting started with Arduino*(爱上Arduino) [M]. YU Xinlong(于欣龙), GUO Haoyun(郭浩贇), tran. Beijing: Posts and Technology Press, 2012: 5-6.
- [24] CHEN Lüzhou(陈吕洲). *Arduino programming guide basis*(Arduino程序设计基础) [M]. Beijing: Beihang University Press, 2014: 11-13.
- [25] HU Haiqing(胡海清). *Fire ecology and management*(林火生态与管理) [M]. Beijing: China Forestry Press, 2005: 25-26.
- [26] ZHOU Kaili(周开利), KANG Yaohong(康耀红). *Neural network model and MATLAB simulation programming*(神经网络模型及其MATLAB仿真程序设计) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 1-5.
- [27] CHEN Ming(陈明). *MATLAB neural network theory and example*(MATLAB神经网络原理及实例精解) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

On the monitoring and detection of the forest fire based on the comprehensive application of the functions of the multi-sensor fusion

QIU Qi-min, ZHENG Chang-e, TIAN Ye, LIU Jin-hao, FU Tian-ju

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper is aimed at introducing its work on the exploration of the ways for monitoring and detection of the forest fire based on the comprehensive application of the functions of the multi-sensor fusion with the purpose to improve the efficiency and the effects of the short-range forest fire. For the said purpose, we have laid-out a real-time multi-sensor monitoring system based on the functions of Arduino, which has been installed in a mobile robot. As is well known, a forest fire tends always to come about with the release of CO, CO₂, and other combustion products, leading to the abrupt elevation of the surrounding temperatures and fire flames. Therefore, it makes it necessary to use available effective detection sensors for the flame, temperature, gas, and smoke on the Arduino controller so as to detect the combustion products and extremely high temperatures to judge the danger and risk likely to lead to by the appearance of the unpredicted fire. Therefore, we have done a series of experiments both under fire-free and fire-going-on conditions so as to accumulate adequate data in need. Besides, the fire-free conditions have to be subjected to different weather conditions while the other fire-producing conditions have to be simulated by igniting different fire phases, for instance, by wetting the lower parts of combustion materials to simulate the pre-heating period and make the simulated data more authentic and reliable. The data analyses we have gained suggest that the output signals of a single sensor tend to fluctuate with some of the output signals overlapped under fire and fire-free conditions. What is more, it seems to us too low to predict and assess the accuracy rate of a forest fire by using a single sensor. However, we have found that their signals may vary from different fire conditions though they may indicate the similar trends of the fire, when we analyze all the output signals of the three kinds of sensors together. And, finally, when the data fusion was made by the artificial neural network (ANN), it would be possible to involve all the five different variables with the ANN being good for the pattern recognition of nonlinear multi-variable problem. Besides, the data we have collected in this paper can be divided into training data and testing data, which may include a ratio between sample fires and sample fire-free cases, because the training data are merely used for training the BP network and then can be used to build up a model for fire detection. The testing data for verifying the accuracy of the model can prove that the accuracy rate of the BP network to detect the experimental fire can be made to reach 98.625% of such facts.

Key words: safety engineering; forest fire detection; multi-sensor; BP neural network; data fusion

CLC number: X43 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2015)01-0111-07

文章编号: 1009-6094(2015)01-0111-06

柱形连通容器内预混气体爆炸过程的火焰传播模拟*

董冰岩, 黄佩玉

(江西理工大学资源与环境工程学院, 江西赣州 341000)

摘要: 为研究连通容器内气体爆炸规律, 采用 Fluent(经典流体动力学软件)对柱形连通容器内预混气体爆炸过程进行模拟, 模拟了不同点火位置和火焰传播方向条件下连通容器内火焰传播过程和压力变化, 并分析了连通容器内不同时刻的速度场。结果表明: 火焰面在传播过程中并非完全对称, 当火焰到达传爆容器后, 湍流燃烧剧烈, 火焰不规则变形显著; 端面点火后在传爆容器内产生的压力峰值和压力波动比中心点火时更大; 当起爆容器为大容器时, 传爆容器内气体预压缩程度更大, 压力峰值更高。

关键词: 安全工程; 可燃气体爆炸; 数值模拟; 连通容器; 点火位置; 火焰传播

中图分类号: X933.4

文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.01.024

0 引言

化工类生产装备中存在各种由管道连接的容器来盛装可燃气体或液体, 被称为连通容器。操作不当、环境因素等原因导致容器中可燃气体发生爆炸(简称起爆容器), 产生的火焰和压力波通过管道进入相邻容器(简称传爆容器), 连通容器内将产生比同尺寸的单容器爆炸更大的压力峰值和压力上升速率^[1-3], 后果更严重。

目前, 众多学者对独立容器和管道内气体爆炸过程进行了试验和数值模拟^[4-8]。试验研究表明, 惰性混合气体的含量会影响可燃气体爆炸极限和抑爆效果^[4], 管道中 Tulip 火焰结构的形成标示着层流向湍流的转变^[5]。因为爆炸过程时间短、升压快, 所以试验研究受场地和不安全因素影响很大。随着各种计算流体力学软件的相继问世及快速发展, 计算机模拟已成为研究压力容器爆炸的重要手段之一。Fluent 是最常用的流体力学软件之一, 它拥有丰富的数学物理模型, 在流体力学、化学反应、燃烧爆炸等方面有着广泛的应用。Fluent 具有条件易于操控、能在计算机上输出清晰图形、可重复模拟等优势。

毕明树等^[6]采用 Fluent 软件对圆柱形容器内混合气体的爆燃过程进行了数值模拟研究, 结果表明容器内爆炸产生的最大压力与初始压力呈正相关关系, 当燃料混合物的化学计量浓度为 1 时, 容器内的爆炸压力最大。唐平等^[7]采用 Fluent 软件模拟了内置障碍物的圆柱形容器通过泄爆管泄爆的过程, 结果表明, 容器内障碍物的形状、位置和数量对超压及压力上升速率有不同影响。毕明树等^[8]采用 Fluent 软件对密

* 收稿日期: 2013-08-30

作者简介: 董冰岩, 教授, 博士, 从事工业灾害事故预防及理论研究
dongbingyan1@sina.com