

# 模糊神经网络算法与火灾探测器的结合

为了降低系统误报率和漏报率，拟将模糊神经网络算法应用到火灾报警系统中，对探测器检测到的多元参数进行数据融合和智能处理，从而提高系统的可靠性和稳定性。在消防控制室内的集中火灾报警控制器上实现火灾智能探测算法，对探测器采集到的信号进行智能化信息处理，以达到更精准地判断火灾产生情况的目的。

杨艳婷/北京城建设计研究总院有限责任公司



杨艳婷/工程师

火灾参数的智能识别及联动装置的启动情况由设置在消防控制室的集中报警控制器完成，因此准确地判断火灾等级及火灾发生位置是整个系统的核心要求。常见的火灾自动报警系统的信号处理采用阈值判断和趋势检测算法，由于采用的传感器数量和种类不断增多，系统的复杂性不断提高，探测器和探测节点会受到周围环境中干扰源的影响，发送的信号数据不稳定，很容易使系统数据达到设定的阈值，从而导致系统的误报率和漏报率升高，可见此种情况下采用阈值判断和趋势检测算法无法从根本上避免系统的误报和漏报的问题。因此火灾探测信息处理的算法问题仍是提高火灾自动报警系统准确度的关键。

## 火灾信号预处理

火灾的发生、发展过程是燃烧物质发生的复杂的物理、化学变化过

程，系统的传感器端对被探测环境中的烟雾浓度、温度及CO气体浓度分别进行信号采集，并对采集的微弱信号进行放大、整形滤波、 $I/V$ （电流/电压）变换以及A-D转换等一系列处理。之后设定烟雾浓度、温度以及CO气体浓度的论域。由于烟雾浓度、温度和CO气体浓度信号的数值可能有明显差异，故应将各输入量归一化，以防止小数值被大数值淹没。归一化的任务交给模糊系统，由模糊系统对输入量进行模糊化，并将其归一化到 $[0,1]$ 区域内，然后再送入后面的网络进行处理。

## 模糊神经网络结构及算法实现

以烟雾浓度、温度及CO气体浓度信号作为输入量，分别以大写字母S、T和G表示，模糊神经网络模型结构如图1所示。

第1层是输入层，三个神经元输入分别为烟雾浓度信号、温度信号和CO气体浓度信号，经过预处理后三种信号传递

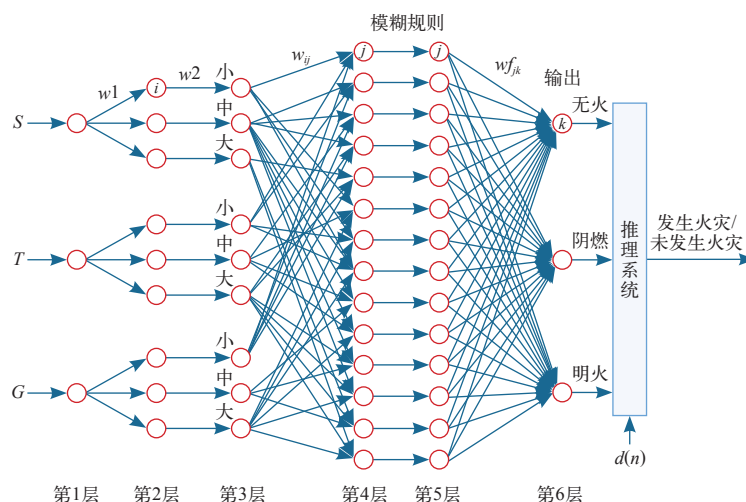


图1 模糊神经网络的结构

### 关键词/Keywords

模糊神经网络算法 ·  
火灾探测器 ·  
隶属函数 ·  
火灾报警系统 ·

到该层。其中第1层的输出表达式为

$$\begin{cases} O_S^{(1)} = I_S^{(1)} = S \\ O_T^{(1)} = I_T^{(1)} = T \\ O_G^{(1)} = I_G^{(1)} = G \end{cases} \quad (1)$$

第2、3层为模糊化层（前向隶属函数层），将各输入变量模糊化为小、中和大三个语言变量值。其中第2层的输出表达式为

$$\begin{aligned} O_{Si}^{(2)} &= I_{Si}^{(2)} = O_{Si}^{(1)} - w1_{Si} \\ O_{Ti}^{(2)} &= I_{Ti}^{(2)} = O_{Ti}^{(1)} - w1_{Ti} \\ O_{Gi}^{(2)} &= I_{Gi}^{(2)} = O_{Gi}^{(1)} - w1_{Gi} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $i=1,2,3$ ，分别对应小、中和大三个语言变量； $w1$ 为第1层的输出。

则式（2）可以简写为 $O_{Mi}^{(2)} = I_{Mi}^{(2)} = O_{Mi}^{(1)} - w1_{Mi}$ ，其中 $M$ 取值为 $S$ 、 $T$ 和 $G$ 。

第2层的输出作为第3层的输入，第3层的输出为

$$\begin{aligned} O_{Mi}^{(3)} &= \frac{1}{1 + e^{w2_{Mi}(O_{Mi}^{(1)} - w1_{Mi})}} = \frac{1}{1 + e^{w2_{Mi}O_{Mi}^{(2)}}} \\ O_{Mi}^{(3)} &= e^{-\frac{1}{2}(\frac{O_{Mi}^{(1)} - w1_{Mi}}{w2_{Mi}})^2} = e^{-\frac{1}{2}(\frac{O_{Mi}^{(2)}}{w2_{Mi}})^2} \\ O_{Mi}^{(3)} &= \frac{1}{1 + e^{-w2_{Mi}(O_{Mi}^{(1)} - w1_{Mi})}} = \frac{1}{1 + e^{-w2_{Mi}O_{Mi}^{(2)}}} \end{aligned} \quad (3)$$

第3层的作用是通过各语言值变量所对应的隶属函数，计算出输入信号属于各语言变量值的模糊集合的隶属度，也就是将输入信息进行模糊化处理。对于不同的语言变量应采用不同的隶属函数。在语言变量中，小、中和大隶属度曲线如图2所示。

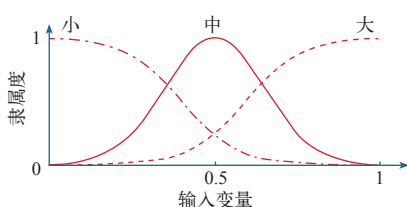


图2 隶属度函数曲线

第4层为模糊规则层，在此层中将进行模糊规则的运算，其输出为

$$O_j^{(4)} = 1 - \prod_i (1 - O_{Mi}^{(3)}) \quad (4)$$

式中， $j$ 取整数，即该层的节点数； $M$ 取 $S$ 、 $T$ 和 $G$ 。

每个节点的输出表示的是对应模糊规则的隶属度函数。

模糊规则的条数 $c$ 与输入信号个数 $n$ 、语言变量个数 $m_i$ 存在的关系表达式为

$$c = \prod_{i=1}^n m_i \quad (5)$$

第4层将在 $S$ 、 $T$ 和 $G$ 三个输入信号以及大、中和小三个语言变量的基础上使用模糊规则。具体采用的IF-THEN规则如下表所示。

表 IF-THEN规则

| 烟雾浓度 ( $S$ ) | 温度 ( $T$ ) | CO气体浓度 ( $G$ ) | 火灾概率 |
|--------------|------------|----------------|------|
| 小            | 小          | 小              | 无火   |
| 中            | 小          | 小              | 无火   |
| 中            | 小          | 中              | 阴燃   |
| 中            | 小          | 大              | 阴燃   |
| 大            | 小          | 大              | 阴燃   |
| 小            | 大          | 中              | 明火   |
| 小            | 大          | 小              | 明火   |
| 中            | 大          | 小              | 明火   |
| 中            | 中          | 中              | 明火   |
| 中            | 大          | 中              | 明火   |
| 中            | 中          | 大              | 明火   |
| 中            | 大          | 大              | 明火   |
| 大            | 中          | 大              | 明火   |
| 大            | 大          | 大              | 明火   |

第5层为归一化层，其输出为

$$O_j^{(5)} = \frac{O_j^{(4)}}{\sum_{r=1}^{14} O_r^{(4)}} \quad (6)$$

由于节点数为14个，所以 $j$ 取1, 2, 3, 4, ..., 14，这也与第4层和第5层数目对应。

第6层为解模糊化处理，也叫输出层，其输出用来监测火灾，具体如下

$$O_k^{(6)} = \sum_{j=1}^{14} O_j^{(5)} w_{fk} \quad (7)$$

式中， $k$ 为该层输出节点数， $k=1,2,3$ ，最终得出明火、阴燃和无火三种结果； $w_{fk}$ 为 $O_k^{(6)}$ 的第 $j$ 个语言对应的隶属函数中心值，同时也表示每条模糊规则的适用度。

火灾未发生和发生时，火灾参量的数据变化均有一定的规律可循。输入样本的值越小，相应

语言变量小的隶属度越大,而语言变量大的隶属度越小;输入样本的值越大,语言变量小的隶属度越小,而语言变量LARGE的隶属度越大,因此语言变量小和大的隶属函数采用Sigmoid函数比较合适,节点的输出范围在[0,1]区域内。

根据BP神经网络的学习规则,利用误差反向传播的梯度下降法来调整连接权系数的值,将上述总误差函数的负梯度方向作为下降方向,使网络的实际输出逐步逼近期望输出。梯度下降法也称为最速下降法,它是由法国著名的数学家柯西于1874年提出来的,是无约束优化中最简单、最基本的方法。梯度下降法基本思想是根据期望输出和实际输出之间的误差二次方最小的基本原则来修改网络的权值矢量。

BP神经网络算法对网络的训练是沿着误差反向传播方向进行的,如果求出的总误差函数值没有满足预设的训练目标,则沿着反向顺序依次对输出层权系数 $w_{jk}$ 、隐含层节点权系数 $w_{2_{Ri}}$ 和隐含层节点权系数 $w_{1_{Ri}}$ 进行调整。

#### (1) 输出层权系数 $w_{jk}$ 的调整

第5、6层之间连接权的系数值 $w_{jk}$ 需要进行调整,而没有连接的权值将被清零,连接权系数 $w_{jk}$ 的修正公式为

$$\Delta w_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial O_k^{(6)}} \frac{\partial O_k^{(6)}}{\partial w_{jk}} \quad (8)$$

其中

$$\frac{\partial E}{\partial O_k^{(6)}} = -(O_k^{(6)} - O_k^{(5)}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial O_k^{(6)}}{\partial w_{jk}} = O_j^{(5)} \quad (10)$$

由式(3)可知,输出层的每个神经元连接权的系数修正公式均可表示为

$$\Delta w_{jk}^f = \eta (\overline{O_k^{(6)}} - O_k^{(6)}) O_j^{(5)} \quad (11)$$

式中, $\eta$ 为网络的学习速率,有时也称为学习步长, $\eta > 0$ ;  $k = 1, 2, 3$ 。

#### (2) 隐含层节点权系数 $w_{2_{Ri}}$

对 $w_{2_{Ri}}$ 调整之前,需要对第3层与第4层之间的连接权系数 $w_{ij}$ 进行说明。在权值参数初始化时,应将连接权系数 $w_{ij}$ 赋值为固定值1,并将未连接的值

清零,所有 $w_{ij}$ 权值都无须调整。其修正公式为

$$\Delta w_{2_{Ri}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{2_{Ri}}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial O_{Ri}^{(3)}} \frac{\partial O_{Ri}^{(3)}}{\partial w_{2_{Ri}}} \quad (12)$$

## 火灾报警系统模糊神经网络算法仿真

根据前文所述采用Matlab构建模糊神经网络结构,并编写其算法程序,通过实时采样的一组数据对网络进行训练,从而使网络能够识别现场是否有火灾。

样本数据一共99组,遴选其中75组数据进行训练,剩余24组作为验证数据。训练后,其隶属度函数如图3所示。

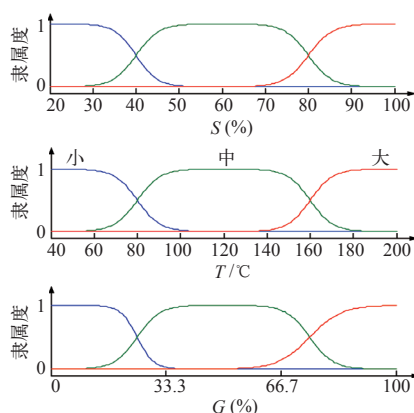


图3 三个输入隶属度函数

对于每一个输入信号,三段隶属度函数曲线分别对应模糊逻辑的大、中和小的隶属程度。网络经过学习后,该模糊逻辑对信号具有一定的分辨能力,可以将实时的烟雾浓度、温度和CO气体浓度以隶属度区分大、中、小三个等级。如果还需细分,可将隶属度函数改为5段或者7段,这样虽然更加准确,但是增加了模糊神经网络的运算量,从而导致报警不够及时。因此选三个模糊分割区间,对应三段隶属度函数。

样本经过100次训练后的训练误差如图4所示,最终误差等级在 $10^{-5}$ 数量级上,对于判断是否发生火灾已经足够准确。

利用剩余的24组数据对建立好的模糊神经网络进行检验,这24组数据与训练数据并不重复,但有相似的规律可循,将 $S$ 、 $T$ 和 $G$ 输入模糊神经网络,其输出结果如图5中实线所示,虚线代表样本

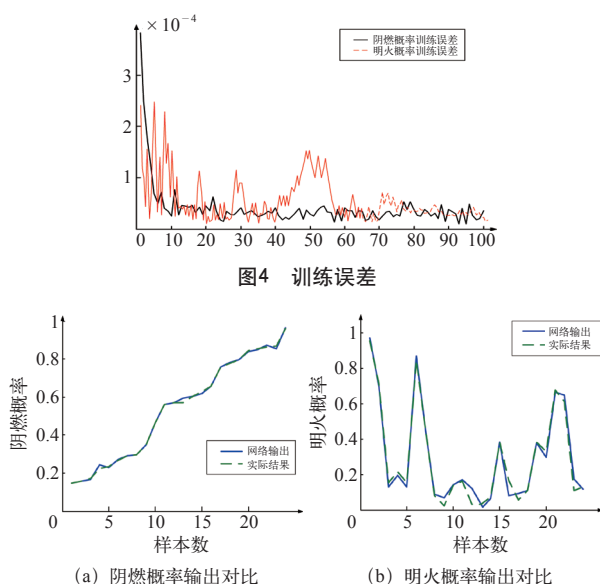


图5 模糊神经网络输出对比

数据的结果。

从图5中可以看出,该网络所输出的结果与数据样本趋势一致,并且相差不大,计算其检验误差如图6所示。

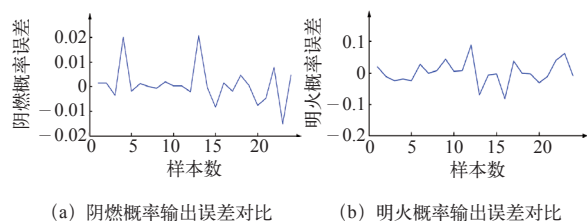


图6 模糊神经网络输出误差

计算输出的均方误差分别为0.001 4和0.032 9,可以看出采用模糊神经网络能够准确识别出现场是否发生火灾,依照输出的概率采取不同的联动措施,以保证旅客的人身安全和财产安全。该智能方法在实际当中也可以自动对一些干扰(如吸烟的不文明行为)进行区分,不会因此而启动报警系统。虽然这种现象不应当存在,但是在设计中还是需要考虑进来,以防止系统的误动作。仿真表明,该系统能够准确探测出明火,对阴燃情况也能够早期发出报警信号;对于普通火灾探测方法无法避免误报的强干扰信号,采用上述算

法较少产生误报。因此,引入模糊神经网络算法进行火灾的判断,降低了整个系统的误报率,提高了系统的性能。

## 智能算法实现

模糊神经网络算法的软件流程如图7所示,通过对由区域报警器上传至集中报警器的现场数据采用文中的模糊神经网络进行计算分析,可以得到三种状态:无火、阴燃和明火的发生概率,从而判断当前的火灾等级。然后根据火灾等级,将相应的信号发送给区域报警器,启动需开启的联动设备。比如,温度 $150^{\circ}\text{C}$ ,烟雾浓度 $150 \times 10^{-6}$ ,CO气体浓度 $75 \times 10^{-6}$ ,通过判断得到阴燃的概率为81.3%,可以准确地得到当前的火灾情况,从而启动联动设备,通知消防人员对火灾进行灭火处理。如果计算出的明火概率超过70%,则迅速开启相应的通风设施,疏散人群,放下防火卷帘,自动启动喷淋系统,并通知消防人员,以避免火灾的扩散。

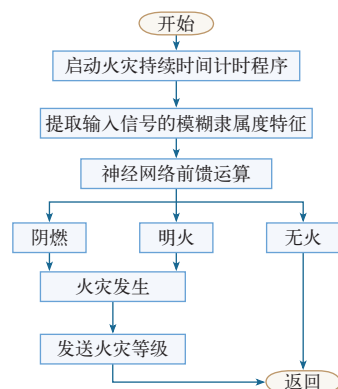


图7 模糊神经网络算法的软件流程

## 结束语

火灾自动报警系统与模糊神经网络算法的结合,实现了信号的智能识别。在Matlab平台,针对现场采样的100组火灾参数信号进行了模糊神经网络的仿真实验,验证了模糊神经网络在火灾智能识别中的优越性。

(收稿日期:2015-06-01) EA