

# 火灾探测的模糊神经网络方法研究<sup>1</sup>

张本矿 吴龙标 王进军

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室 合肥 230027)

**摘要** 本文把火灾的探测归结为与火灾特征信号相对应的各种规则,并用模糊技术和神经网络提取这种规则,推导了神经网络和模糊技术相结合的新算法.分析结果表明:模糊神经网络用于火灾探测是行之有效的办法.

**关键词** 模糊规则,神经网络,火灾探测

**中图分类号** TN-052

## 1 引言

火灾探测可以归结为火灾各种状态空间的识别.火灾状态空间一般分为三种,即无火状态、阴燃状态和火灾状态.各种火灾信号如温度、烟、光和气体成分等的性态,对应着火灾三种状态,其对应关系可以看成一种规则,而这种规则很难用精确的数学公式表达.模糊技术具有较强的逻辑推理能力,可以用来处理这种火灾探测的问题.但是一直困扰模糊技术应用的核心问题是模糊变量基本状态隶属度函数的自动生成和模糊规则的自动提取<sup>[1]</sup>.神经网络处理模糊的火灾信号具有一定的优越性<sup>[2]</sup>,他存在的问题是学习收敛速度很慢以及网络内部单元连接权的物理意义不明确.把神经网络和模糊技术结合起来,用神经网络自动生成火灾模糊信号变量的隶属度函数和火灾探测的模糊规则,不仅模糊推理具有自学习的功能而且使神经网络单元对应着实际的物理意义,为火灾探测提供了一种更为快速、准确的方法.

## 2 模糊神经网络的结构及其算法

若采用 Sugeno 模糊推理计算模型<sup>[1,3]</sup>,则模糊规则的表达式和计算公式为

$$R_k : \text{如果 } (x_0 \text{ is } A_{i_1 0}) \text{ and } \cdots \text{ and } ((x_{n-1} \text{ is } A_{i_m (n-1)}), \text{ 则 } y_k = z_k, \quad (1)$$

$R_k$  表示第  $k$  条规则,  $x_0, x_1, \cdots, x_{n-1}$  和  $y_k$  分别表示输入输出,  $A_{i_l j} (l = 1, 2, \cdots, m; i_l \in (1, 2, \cdots, m))$  是隶属度函数  $\mu_{A_{i_l j}}$  所表征的模糊数,  $z_k$  是实数值. 设

$$\mu_k = \mu_{A_{i_1 0}} * \mu_{A_{i_2 1}} * \cdots * \mu_{A_{i_m (n-1)}}, \quad k = 0, 1, \cdots, m^{n-1}, \quad (2)$$

在火灾探测中,假设有  $n$  个信号输入,每个输入变量空间被分为  $m$  个子空间.因为有三个火灾状态空间,即无火状态、阴燃状态和火灾状态,所以  $m = 3$ ,规则有  $3^n$  个.则推理过程如式:

$$y = \frac{\sum_{k=0}^{3^n-1} \mu_k z_k}{\sum_{k=0}^{3^n-1} \mu_k}. \quad (3)$$

模糊神经网络的结构为  $n-3n-3^{n-1}$ ,如图 1 所示.各层的输入输出为第 1 层:

$$I_j^{(1)} = x_j, O_j^{(1)} = I_j^{(1)} = x_j, j = 0, 1, \cdots, n-1; \quad (4)$$

<sup>1</sup> 1998-12-04 收到, 1999-07-28 定稿

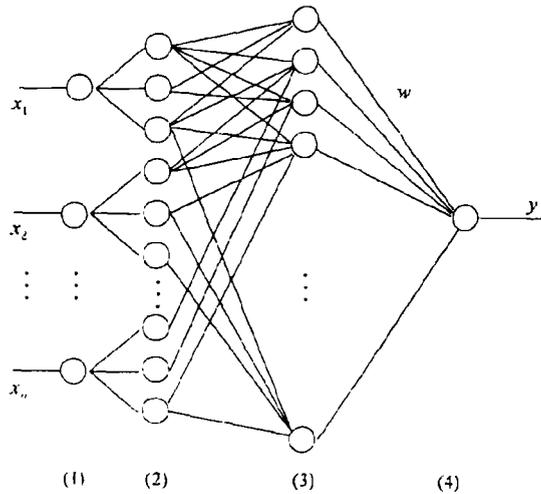


图 1 模糊神经网络结构

上标表示层数，以下同。

第 2 层:

$$I_{ij}^{(2)} = O_j^{(1)}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1; \quad (5)$$

$$O_{ij}^{(2)} = \begin{cases} 1 - / [1 + \exp(-(a_{0j} I_{0j}^{(2)} + b_{0j}))], & i = 0; \\ \exp(-(a_{2j} I_{2j}^{(2)} + b_{ij})^2). & i = 1; \\ 1 / [1 + \exp(-(a_{1j} I_{1j}^{(2)} + b_{1j}))], & i = 2; \end{cases} \quad (6)$$

$j$  表示组数，即输入火灾信号数； $i$  表示每组中的三个之一的状态， $i = 0, 1, 2$  分别对应着无火状态、阴燃状态和火灾状态的模糊空间。

该网络是前馈局部连接网络。第 2 层和第 3 层的对应关系为第  $0, 1, \dots, n-1$  组的  $i$  分别取  $(00 \dots 00)$  对应第 3 层的第 0 个元素，同理  $(00 \dots 01) \rightarrow 1, (00 \dots 02) \rightarrow 2, (00 \dots 10) \rightarrow 3, (00 \dots 11) \rightarrow 4, (00 \dots 20) \rightarrow 5, \dots, (22 \dots 22) \rightarrow 3^n - 1$ 。这相当于把第 2 层的  $n$  组单元按上述和图 1 的排列表示为“3”进制数，转换成“10”进制数后，则对应第 3 层的元素。

定义  $f(k, j) = \{10 \text{ 进制数 } k \text{ 中的 } n \text{ 位 } 3 \text{ 进制数的第 } n-1-j \text{ 位上的数}\}$ 。

这样对任意给定第 3 层中的单元，就很容易得到第 2 层中与它对应的单元，例如任给  $k$  单元，把  $k$  化为 3 进制  $(b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_0)$ ，则第 2 层中的第 0 组的第  $b_{n-1}$  个单元与之对应，第 1 组的第  $b_{n-2}$  个单元与之对应， $\dots$ ，第  $n-1$  组的第  $b_0$  个单元与之对应。

$f(k, 0) = b_{n-1}, f(k, 1) = b_{n-2}, \dots, f(k, n-1) = b_0$ 。

第 3 层:

$$\left. \begin{aligned} I_k^{(3)} &= \prod_{j=0}^{n-1} O_{f(k,j)}^{(2)} \\ O_k^{(3)} &= I_k^{(3)}, \quad k = 0, 1, \dots, 3^n - 1. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

第 4 层:

$$y = \sum_{k=0}^{3^n-1} w_k O_k^{(3)} / \left( \sum_{i=0}^{3^n-1} O_k^{(3)} \right). \quad (8)$$

第 1 层第 2 层对应着模糊推理的前件, 第 2 层对应着模糊空间; 第 3 层第 4 层对应着模糊推理的后件, 反映着各个模糊空间对整个输出的影响. 需要优化的是  $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$ 、 $w_i$ , 优化的过程是在模糊神经网络的训练中完成的. 对  $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$  的优化即是完成隶属度函数的自动生成, 对  $w_i$  的优化即是完成模糊规则的自动提取. 网络的算法采用 BP 算法,  $t$  为教师信号. 下面给出网络的学习算法.

$$E = (1/2)(t - y)^2. \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} w_k(r+1) &= w_k(r) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_k}, \quad k = 0, 1, \dots, 3^n - 1; \\ a_{ij}(r+1) &= a_{ij}(r) - \eta \frac{\partial E}{\partial a_{ij}}, \quad i = 0, 1, 2; \quad j = 0, 1, \dots, n-1; \\ b_{ij}(r+1) &= b_{ij}(r) - \eta \frac{\partial E}{\partial b_{ij}}, \quad i = 0, 1, 2; \quad j = 0, 1, \dots, n-1; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_k} = -(t - y) \frac{\partial y}{\partial w_k} = -(t - y) O_k^{(3)} / \sum_{k=0}^{3^n-1} O_k^{(3)}. \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a_{ij}} &= -(t - y) \frac{\partial y}{\partial a_{ij}}; \\ \frac{\partial y}{\partial a_{ij}} &= \frac{\left( \sum_{k=0}^{3^n-1} O_k^{(3)} \right) \left( \sum_{f(k,j)=t}^{3^n-1} \left( w_k \frac{\partial O_k^{(3)}}{\partial a_{ij}} \right) \right) - \left( \sum_{k=0}^{3^n-1} w_k O_k^{(3)} \right) \left( \sum_{f(k,j)=i}^{3^n-1} \frac{\partial O_k^{(3)}}{\partial a_{ij}} \right)}{\left( \sum_{k=0}^{3^n-1} O_k^{(3)} \right)^2}; \\ \frac{\partial O_k^{(3)}}{\partial a_{f(k,j)j}} &= \left( \prod_{\substack{l=0 \\ l \neq j}}^{n-1} O_{f(k,l)l}^{(2)} \right) \frac{\partial O_{f(k,j)j}^{(2)}}{\partial a_{f(k,j)j}}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

同理

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial b_{ij}} &= -(t - y) \frac{\partial y}{\partial b_{ij}}; \\ \frac{\partial y}{\partial b_{ij}} &= \frac{\left( \sum_{k=0}^{3^n-1} O_k^{(3)} \right) \left( \sum_{f(k,j)=i}^{3^n-1} \left( w_k \frac{\partial O_k^{(3)}}{\partial b_{ij}} \right) \right) - \left( \sum_{k=0}^{3^n-1} w_k O_k^{(3)} \right) \left( \sum_{f(k,j)=i}^{3^n-1} \frac{\partial O_k^{(3)}}{\partial b_{ij}} \right)}{\left( \sum_{k=0}^{3^n-1} O_k^{(3)} \right)^2}; \\ \frac{\partial O_k^{(3)}}{\partial b_{f(k,j)j}} &= \left( \prod_{\substack{l=0 \\ l \neq j}}^{n-1} O_{f(k,l)l}^{(2)} \right) \frac{\partial O_{f(k,j)j}^{(2)}}{\partial b_{f(k,j)j}}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$\partial O_k^{(2)}/\partial a_{ij}$  和  $\partial O_k^{(2)}/\partial b_{ij}$  可由 (6) 式求得。由 (4)~(8) 式构成了前向计算, 由 (9)~(13) 式构成了 BP 的反传算法。

### 3 模糊神经网络火灾探测结果分析

如图 2 是实验所得到的燃烧时 CO 浓度、温度、烟雾浓度、H<sub>2</sub> 浓度和 O<sub>2</sub> 浓度的变化曲线。实验将 70 块干燥的木块 (大小为 1cm×2cm×25cm) 用 5ml 的甲基化酒精点燃。实验是在 25°C 室温下进行的, 实验初始期是一个缓慢燃烧的过程, 只有很少量的烟雾产生。在实验的后期, 木材充分燃烧, 火焰温度和传播速度达到最盛, 并产生大量的烟雾。

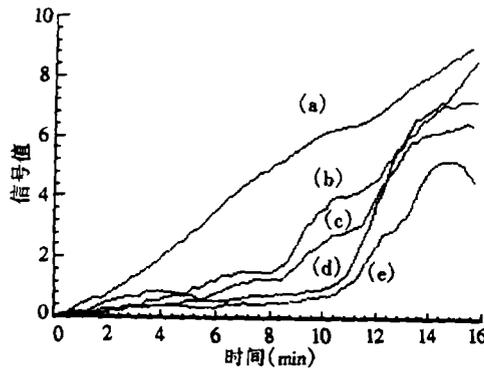


图 2 木材燃烧时火灾信号变化曲线  
(a) CO 浓度 (×5ppm) (b) 温度 (×10°C+25°C) (c) 烟雾  
×0.25dB/m (d) H<sub>2</sub> 浓度 (×0.5ppm) (e) O<sub>2</sub> 减少量 (×500ppm)

用模糊神经网络对五组信号进行火灾识别模拟, 所以信号的输入数  $n = 5$ , 网络采用 5-15-243-1 结构形式。每种信号分别在代表无火状态、阴燃状态、火灾状态各取 10 个样本, 构成每种信号的小 (Small)、中 (Middle)、大 (Big) 模糊子空间, 这样的五组模糊子空间组合, 形成 243 个模糊子空间。通过对这些空间规则的学习, 从而达到探测、分类和识别火灾。如图 3 为学习而得到的温度隶属度函数。图 4 为其他信号固定, 仅有温度和 CO 浓度两种信号的探测识别结果。

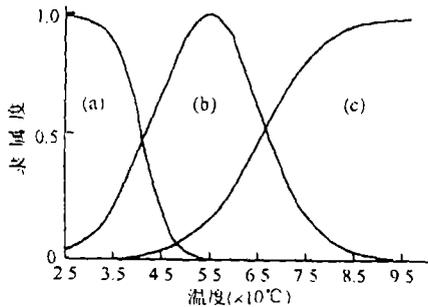


图 3 温度隶属度函数  
(a) 无火 (Small)  
(b) 阴燃 (Middle)  
(c) 火灾 (Big)

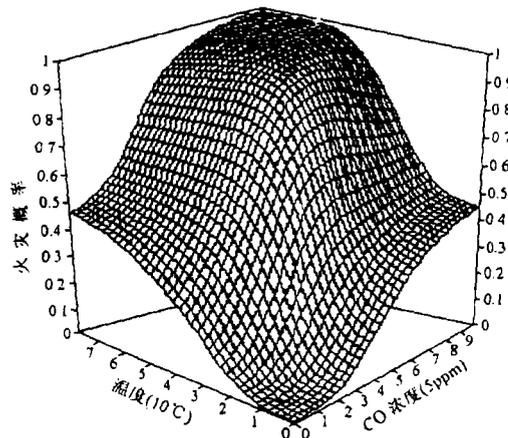


图 4 温度与 CO 浓度和火灾可能性的关系

温度常常是用于检测火灾的信号。从图 3 可以看出, 温度在  $35^{\circ}\text{C}$  以内基本上为无火状态; 在  $45 - 65^{\circ}\text{C}$  之间为阴燃状态; 在  $65^{\circ}\text{C}$  以后引起火灾, 这与实际情况相符。研究还表明, 如果环境温度较低或较高时, 隶属度函数曲线将相应地向低温段或高温段平移, 表现出对环境的自适应性, 限于篇幅, 不再赘述。从图 4 可以看出, 在两种信号都比较小时, 发生火灾的可能性最小; 当两种信号都较大时, 则发生火灾的可能性几乎 100%; 在其它情况下, 发生火灾有一定的可能性, 在对多种火灾探测时, 某路信号产生较大干扰, 仍能探测出火灾。

#### 4 结 论

火灾的发生表现出一定的规律, 本文把这种规律归结为与火灾特征信号相对应的各种规则, 并用模糊技术和神经网络提取这种规则, 推导了神经网络与模糊技术相结合的算法, 该算法适合  $n$  个输入变量, 每个变量分为无火、阴燃、火灾三个状态, 如果把  $f(n, j)$  定义为  $f(k, j) = \{10 \text{ 进制数 } k \text{ 中的 } n \text{ 位 } m \text{ 进制数的第 } n - 1 - j \text{ 位上的数}\}$ , 网络结构定义为  $n \sim mn \sim m^n \sim 1$ , 在第 2 层选择合适的隶属度函数的形式, 该算法适合  $n$  个输入, 每个输入分为  $m$  个状态的问题模糊推理; 同时实现了模糊变量基本状态隶属度函数的自动生成和模糊规则的自动提取。通过结果分析表明: 模糊神经网络用于火灾探测是行之有效的方法, 用模糊推理的技术探测火灾, 不仅能有效地探测火灾, 同时可以增强抗干扰能力, 提高探测器对环境的自适应性。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘增良, 刘有才. 模糊逻辑与神经网络——理论研究与探索. 北京: 北京航空航天大学出版社, 第一版. 1996 年 5 月, 189-218.
- [2] Longbiao Wu, Deng Chao, Weicheng Fan. A new method in fire detection. Asia-Oceania association for fire detection science and technology, 1995. 9, 256-261.
- [3] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Trans. on SMC, 1985, SMC-15(1): 166-132.
- [4] Liu Chi-Teng, George C S. Neural-networks-based fuzzy logic control and decision system. IEEE Trans. on Computer, 1991, C-40(12): 1320-1336.

### STUDY ON FUZZY NEURAL NETWORKS FOR FIRE DETECTION

Zhang Benkuang    Wu Longbiao    Wang Jinjun

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027)

**Abstract** In this paper, the fire detection is divided into various rules related with the fire characteristic signals, the fuzzy theory and the neural networks are applied to get the rules. The new algorithm combining the fuzzy theory and the neural networks is deduced. The results are manifested: the fuzzy neural network is an effective technology for fire detection.

**Key words** Fuzzy rules, Neural networks, Fire detection

张本矿: 男, 1971 年生, 硕士生, 研究领域为信息处理, 神经网络.

吴龙标: 男, 1939 年生, 教授, 研究领域为火灾探测与联动控制, 信号检测, 神经网络.

王进军: 男, 1975 年生, 在职研究生, 研究领域为火灾探测, 信号检测与处理.