

# 一类提取模糊规则的新方法及其在干燥建模中的应用\*

吴 涛 许晓鸣 方兴其  
(上海交通大学自动化系 200030)

**摘 要** 基于系统的输入—输出数据, 提出一种通过划分输入空间提取模糊规则的方法, 并将该方法应用于建模非线性程度较高的干燥过程。建模过程中, 首先利用训练样本将输入空间动态地划分为若干个子空间, 然后针对每一子空间产生一条模糊规则, 再将所产生的模糊规则共同构成一个模糊规则库, 模糊逻辑系统的最终输出从模糊规则库中产生。仿真结果表明, 该方法可很好地预测干燥系统的物料降水率, 而且简单实用, 十分可靠。

**关键词** 模糊规则, 建模, 干燥, 输入空间  
**分类号** TP 273

## A New Method to Create Fuzzy Rules and Its Application to Modelling of the Drying Process

W u T a o , X u X i a o m i n g , F a n g X i n g q i  
(Shanghai J i a o t o n g U n i v e r s i t y)

**Abstract** Based on the input- output data of the system, a new method to create fuzzy rules by dividing the input space was proposed and applied to modelling of the non- linear drying process. The input space was first divided into a set of subspaces using training data, then a fuzzy rule was created for each subspace. These rules were combined to produce a fuzzy rule based model. The simulation results show that this method is simple, easy, reliable and works well in modelling of the drying process.

**Key words** fuzzy rules, model, drying, input space

### 1 引 言

文献[1]指出, 对于绝大多数工程系统而言, 有两种重要的信息来源, 即数据信息和语言信息。传统的工程设计方法只能利用数据信息, 而对于专家所提供的描述系统性能的语言信息却难于加以利用。虽然这类描述系统的语言信息并非十分准确, 但却提供了系统的重要信息, 有时甚至是了解系统的唯一信息来源。因此, 系统而有效地利用此类模糊语言信息已成为一个重要的研究课题。

模糊集合理论的提出为工程设计人员带来了光明<sup>[2]</sup>。在过去的 20 年里, 模糊集合理论在不同的领

域得到了广泛应用, 其中最富有成果、最重要的应用之一是在控制领域的应用, 即模糊逻辑控制。模糊控制中模糊规则的提取是最重要的研究课题之一, 从某种意义上说, 模糊控制理论的发展也是围绕着模糊控制规则的获取而展开的。Sugeno 总结了 4 种获取模糊规则的方法<sup>[1]</sup>, 即:

- 1) 基于专家的经验 and 知识;
- 2) 建立操作者的控制行为模型;
- 3) 建立被控对象的模型, 即模糊辨识;
- 4) 自组织, 即通过类似神经网络的学习过程来不断调整控制规则集。

\* 国家自然科学基金重点基金项目(59736130)和中国科学院“九五”基础性研究重大项目(KJ951—B 1—704)  
1998- 08- 20 收稿, 1999- 01- 11 修回

其中,建立被控对象的模型是真正实现理想的模糊控制的基础。

本文基于被控系统的已知输入—输出数据,提出一种通过划分输入空间提取模糊规则的新方法。仿真结果表明,通过这种建模方法所产生的非线性系统辨识模型能够很好地逼近真实系统。

## 2 基于模糊逻辑的对撞流干燥器干燥特性建模方法

对撞流干燥是目前国内外正在研究开发的一种新型干燥工艺,具有高强度的干燥效果。它在很短时间内(1~20s)就能完成数倍乃至数百倍于常规干燥方式的脱水量,具有干燥强度大,节能效果明显,物料的干燥品质好以及设备紧凑,适应性强等优点。然而,对于对撞流干燥这类新型高强度的干燥方式而言,由于颗粒在干燥器内悬浮流动,高度湍流,运动规律十分复杂,目前仍无法从其内部的运动机理和传热传质特性出发建立准确的数学模型。本文采用文献[4]中的实验数据,提出一种提取模糊规则的新方法,并将其用于预测干燥过程的降水率。

在对撞流干燥系统中,有两个比较重要的因素影响整个干燥过程的干燥特性,即载带率(进料量与空气流量之比) $x_1$ 和干燥器入口处的热风温度 $x_2$ 。我们把它们作为干燥器模型的输入变量,把被干燥物料的降水率作为输出变量 $y$ 。根据已知的实验数据, $x_1$ 的定义域为 $[a_1, b_1] = [0.011, 0.046]$ , $x_2$ 的定义域为 $[a_2, b_2] = [62, 130]$ 。

下面介绍基于模糊逻辑的对撞流干燥器干燥特性的建模过程。

### 2.1 定义模糊集的隶属函数

首先定义区间的隶属函数。采用梯形隶属函数,假设 $[a_i, b_i]$ 是输入 $x_i$ 的原始输入空间,对于区间 $b = [c_i, d_i] \subseteq [a_i, b_i]$ ,区间长度为 $w = d_i - c_i$ ,区间中心为 $m_b = c_i + w/2$ ,则 $[c_i, d_i]$ 上的隶属函数定义为

$$\mu_b(x) = \begin{cases} 1, & x \in [c_i, m_b + q/2] \\ 1 - \frac{x - (m_b + q/2)}{p/2 - q/2}, & x \in [m_b + q/2, m_b + p/2] \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{else if } d_i = b_i \begin{cases} 1 - \frac{m_b - q/2 - x}{p/2 - q/2}, & x \in [m_b - p/2, m_b - q/2] \\ 1, & x \in [m_b - q/2, d_i] \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{else } \mu_b(x) = \begin{cases} 1 - \frac{m_b - q/2 - x}{p/2 - q/2}, & x \in [m_b - p/2, m_b - q/2] \\ 1, & x \in [m_b - q/2, m_b + q/2] \\ 1 - \frac{x - m_b - q/2}{p/2 - q/2}, & x \in [m_b + q/2, m_b + p/2] \end{cases} \quad (3)$$

其中 $q$ 和 $p$ 值可按经验选取。这里令 $q = 0.7w$ , $p = 1.5w$ 。

### 2.2 划分输入空间

基于模糊逻辑系统的建模方法的关键是将输入空间动态地划分为若干个子空间,然后提取模糊规则。输入空间的划分方法是:首先将每个输入变量的定义域依次划分为两个子空间。“依次”是指在划分一个输入变量的定义域时,其他输入变量的定义域保持不变,这样每次划分的结果都只产生两个子空间 $b_1$ 和 $b_2$ 。划分的原则是根据经验,取定义域区间长度的35%,50%和65%三个位置。对于文献[4]中的对撞流干燥系统, $x_1$ 和 $x_2$ 的原始定义域区间长度分别为: $w_1 = 0.046 - 0.011 = 0.035$ , $w_2 = 130 - 62 = 68$ ,则第一“刀”有6种划分候选方法,即:

- 1)  $b_1: x_1 \in [0.011, 0.0232]$   
 $x_2 \in [62, 130]$
- $b_2: x_1 \in [0.0232, 0.046]$   
 $x_2 \in [62, 130]$
- 2)  $b_1: x_1 \in [0.011, 0.0285]$   
 $x_2 \in [62, 130]$
- $b_2: x_1 \in [0.0285, 0.046]$   
 $x_2 \in [62, 130]$
- 3)  $b_1: x_1 \in [0.011, 0.0338]$   
 $x_2 \in [62, 130]$
- $b_2: x_1 \in [0.0338, 0.046]$   
 $x_2 \in [62, 130]$
- 4)  $b_1: x_1 \in [0.011, 0.046]$   
 $x_2 \in [85.8, 130]$
- $b_2: x_1 \in [0.011, 0.046]$   
 $x_2 \in [62, 85.8]$
- 5)  $b_1: x_1 \in [0.011, 0.046]$   
 $x_2 \in [96, 130]$
- $b_2: x_1 \in [0.011, 0.046]$   
 $x_2 \in [62, 96]$
- 6)  $b_1: x_1 \in [0.011, 0.046]$   
 $x_2 \in [106.2, 130]$

$$b_2: x_1 \quad [0.011, 0.046]$$

$$x_2 \quad [62, 106.2]$$

根据 2.1 节定义的区间隶属函数, 计算被分割后的每个子区间  $b_i (i = 1, 2)$  的输出标记 (Label)

$$c_{b_i} = \frac{\sum_{j=1}^M \min(\mu_{b_i}(x_1^j), \mu_{b_i}(x_2^j)) y^j}{\sum_{j=1}^M \min(\mu_{b_i}(x_1^j), \mu_{b_i}(x_2^j))} \quad (4)$$

式中,  $\{(x_1^j, x_2^j, y^j) | j = 1, 2, \dots, M\}$  是  $M$  个训练数据点,  $\min(\mu_{b_i}(x_1^j), \mu_{b_i}(x_2^j))$  是第  $j$  对训练样本的输入隶属度, 每个输入变量对于区间  $b_i$  的隶属度  $\mu_{b_i}(x_1^j)$  和  $\mu_{b_i}(x_2^j)$  根据 (1) — (3) 式计算得到。在本例中,  $M = 110$ 。

这样, 当将一个空间划分为两个子空间后, 可以计算两个子空间的模糊隶属函数和相应的输出标记。对于 6 种划分候选方法, 根据输出标记之差最大的原则确定该次最终的划分方法, 即比较两个子空间的输出标记之差  $|c_{b_1} - c_{b_2}|$ , 最大者所对应的区间划分作为最佳方法。这种划分原则的意义是两个子空间的输出标记之差越大, 意味着当系统输入分别落入这两个子空间时, 系统行为的差异越大, 需要用两条不同的模糊规则来描述这两个空间的输入—输出特性; 当两个子空间的输出标记之差为零或接近零时, 只需一条模糊规则就可描述这两个空间的系统行为特性, 即输入空间不需要继续划分。根据这一原则, 在上述 6 种划分方法中, 6) 成为第一次的最终划分, 即第一“刀”是将整个输入空间按  $x_2$  划分为  $[62, 106.2], [106.2, 130]$ ,  $x_1$  保持不变, 仍为  $[0.011, 0.046]$  (见图 1)。

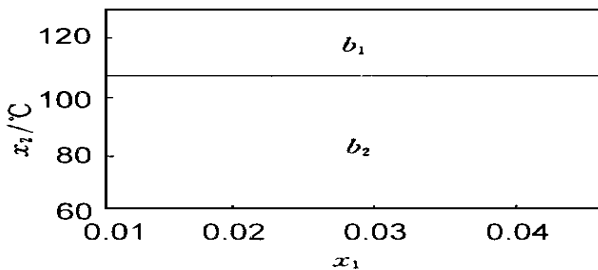


图 1 输入空间的第一次划分结果

在第一次划分结束后, 将每一个子空间视为一个独立单位, 分别重复上述划分方法, 直至产生的两个子空间的输出标记之差小于某一给定值  $\min_n$ , 则结束整个划分过程,  $\min_n$  的选取与建模精度有关。在对撞流干燥过程的建模中, 取  $\min_n = 0.001$ , 则整个输入空间最终被划分为 20 个子空间。划分结果如图 2 所示。

### 2.3 提取模糊规则

在将输入空间划分为 20 个子空间后, 需要提取每个子空间所对应的模糊规则。下面以第一个子空间为例, 说明模糊规则的提取过程。对于第一个子空间:  $[c_1, d_1] = [0.011, 0.0338]$ ,  $[c_2, d_2] = [62, 77.47]$ , 因为  $c_1 = a_1 = 0.011$ ,  $c_2 = a_2 = 62$ , 根据 2.1 节定义的隶属函数, 得到输入变量对于第一个子空间的隶属函数。即当系统输入为  $(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$  ( $[0.011, 0.046], [62, 130]$ ) 时, 有

$$\mu_{b_1}(\hat{x}_1) = \begin{cases} 1, & \hat{x}_1 \in [0.011, 0.0304] \\ 1 - \frac{\hat{x}_1 - 0.0304}{0.0395 - 0.0304}, & \hat{x}_1 \in [0.0304, 0.0395] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{b_1}(\hat{x}_2) = \begin{cases} 1, & \hat{x}_2 \in [62, 75.1495] \\ 1 - \frac{\hat{x}_2 - 75.1495}{81.3375 - 75.1495}, & \hat{x}_2 \in [75.1495, 81.3375] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

每条模糊规则的输出是根据已知的输入—输出数据, 由 (4) 式计算得出的。在本例中, 将 110 对训练样本数据代入 (4) 式, 得到  $y = 7.3499$ 。将这条模糊规则用图形表示, 如图 3 所示。

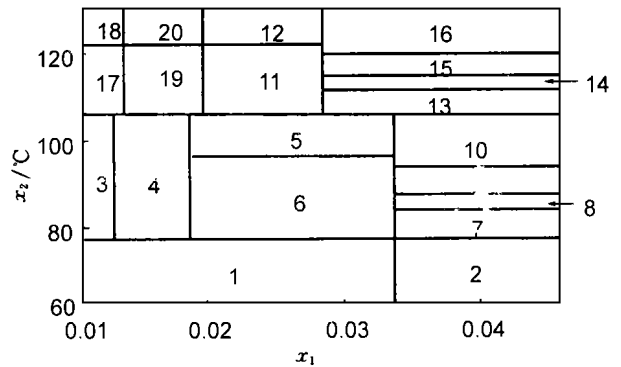
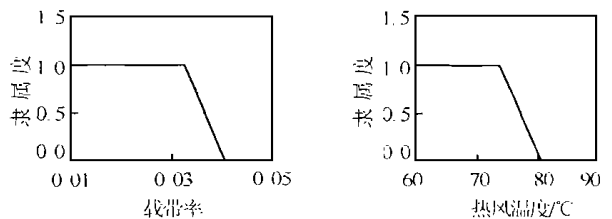


图 2 输入空间的最终划分结果



$$\text{if } x_1 \text{ and } x_2 \text{ then } y = 7.3499$$

图 3 对应于第一个子空间的模糊规则

所有 20 个子空间所对应的模糊规则都可以采用类似的方法获得。这样就完成了模糊规则的提取

过程。

## 2.4 去模糊化

对碰撞干燥的模糊逻辑建模方法的最后一步是去模糊化,即根据系统输入预测系统输出,实现其建模和预测功能。

我们采用“质心法”进行去模糊化,即当干燥过程的载带率和干燥器入口处的热风温度为 $(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$ 时,干燥过程的降水率为

$$\hat{y}(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = \frac{\sum_{i=1}^{20} \min(\mu_{b_i}(\hat{x}_1), \mu_{b_i}(\hat{x}_2)) \times c_{b_i}}{\sum_{i=1}^{20} \min(\mu_{b_i}(\hat{x}_1), \mu_{b_i}(\hat{x}_2))} \quad (7)$$

式中 $c_{b_i} (i = 1, 2, \dots, 20)$ 按(4)式计算。

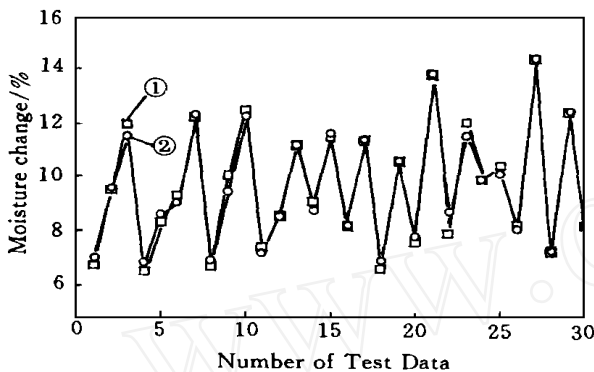


图4 实际的物料降水率与模糊逻辑模型预示结果的比较

图4是采用上述模糊逻辑建模方法,针对30对测试数据(这些测试数据未用于产生联合模糊规则库),实际的物料降水率(图中 )与由去模糊化所得到的干燥模型预示结果(图中 )的比较。通过观察可知,在已知载带率、热风温度和物料的初始湿含量的情形下,该模糊逻辑模型能较准确地预测物料

降水率的变化。

## 3 结 论

模糊控制技术的一个关键性问题是模糊规则的提取。本文提出一种通过划分输入空间提取模糊规则的方法,并将该方法应用于对碰撞干燥器的干燥特性的建模。仿真结果表明,基于模糊逻辑理论的非线性系统的建模方法,可以准确地预测干燥系统的物料降水率,而且简单实用,十分可靠。

## 参 考 文 献

- 1 Sugeno M. An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences*, 1985, 36: 59- 83
- 2 L A Zadeh. Fuzzy algorithm. *Information and Control*, 1968, 12: 94- 102
- 3 C C Lee. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller- Part I, Part II. *IEEE Trans on Syst Man and Cybern*, 1990, 20(2): 404- 418
- 4 胡学功, 刘登瀛, 张长梅, 等. 垂直碰撞流干燥机干燥特性的实验研究. 见: 第六届全国干燥会议论文集. 无锡, 1997

## 作 者 简 介

吴 涛 女, 1972年生。上海交通大学自动化系博士研究生。主要研究领域为智能控制理论及其在工业过程控制中的应用。

许晓鸣 男, 1957年生。1987年在上海交通大学自动化系获博士学位, 现为上海交通大学副校长, 教授, 博士生导师。主要研究领域为智能控制及其在工业过程中的应用。

方兴其 男, 1969年生。1994年在上海交通大学自动控制理论及应用专业获硕士学位, 现为上海交通大学自动化系讲师。主要研究方向为智能控制及其在工业过程中的应用。