

# 高频真空木材干燥的模糊神经网络控制方法研究

姜滨, 孙丽萍, 曹军, 周正

(东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040)

**[摘要]** 高频真空木材干燥是一种干燥速度快、能源消耗低、环境污染小的新型联合干燥技术。在木材高频真空联合干燥过程的理论分析基础上, 针对神经网络方法建立的木材干燥模型, 设计了木材干燥模糊控制器和模糊神经网络控制器。对模糊控制和模糊神经网络两种控制方法进行了仿真实验, 结果表明模糊神经网络方法控制效果更好, 如温度上升快, 控制精度高, 稳定性好。模糊神经网络控制方法对实现木材干燥过程的全自动控制具有重要研究意义。

**[关键词]** 高频真空; 木材干燥; 模糊神经网络

**[中图分类号]** S781.71 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)04-0017-04

## 1 前言

高频真空木材干燥是一种干燥速度快、能源消耗低、环境污染小的新型联合干燥技术<sup>[1]</sup>。该技术具备高频干燥和真空干燥各自的优点, 在减少木材干燥过程中由于局部温度过高而发生开裂或烧焦可能性的同时, 缩短了干燥时间; 另外, 还保证了木材的干燥品质<sup>[2]</sup>。在传统 proportional integral derivative (PID) 控制的基础上, 将神经网络和模糊控制结合能够实现系统的智能控制, 改善系统性能, 提高控制精度。

## 2 高频真空木材干燥的模糊控制方法

高频真空木材干燥过程具有非线性和复杂性的特点, 常规控制往往不能满足控制精度, 模糊控制是一种不依赖数学模型的非线性智能控制方法<sup>[3]</sup>。根据木材干燥模糊控制过程和木材高频真空干燥工艺过程, 将干燥窑内木材中心温度与给定温度之间的误差  $e$  及误差变化率  $ec$  作为控制器的输入, 将高频控制信号  $g$  作为控制器的输出<sup>[4]</sup>。由

于输入参数误差  $e$  及误差变化率  $ec$  和输出参数高频控制信号  $g$  都是精确量, 因此需进行模糊化使之变成模糊量, 木材干燥模糊控制系统如图 1 所示。

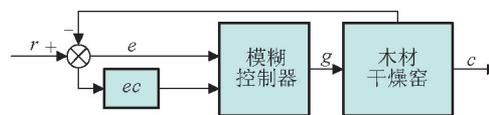


图1 木材干燥模糊控制系统方框图

Fig.1 Block diagram of wood drying control system

注:  $r$  为木材干燥窑的给定温度;  $c$  为木材干燥窑的实际输出温度

模糊化过程中选取高斯函数作为各模糊子集在相应论域上的隶属函数<sup>[5]</sup>。高斯型隶属函数形式为

$$f(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\delta^2}} \quad (1)$$

式(1)中,  $c$  为高斯函数的对称中心;  $\delta$  为函数宽度。在基本模糊控制器的设计中, 这两个值根据经验给出, 具体输入输出量的隶属度函数设计如下: 温度误差的模糊等级为 7, 集合论域为

**[收稿日期]** 2014-01-20

**[作者简介]** 孙丽萍, 1958年出生, 女, 黑龙江哈尔滨市人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能检测、模式识别、木材科学与技术方面的研究; E-mail: zdhspl@163.com

[ -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6 ],则将温度误差隶属函数中  $c$  取值为 -6, 4, -2, 0, 2, 4, 6;  $\delta$  的值为 1.2。温度误差变化率的模糊等级为 5, 集合论域为 [-4, -2, 0, 2, 4], 则将温度误差变化率隶属函数中  $c$  取值为 -4, -2, 0, 2, 4;  $\delta$  的值为 1.2。控制输出量的模糊等级为 4, 集合论域为 [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6], 则将控制输出量隶属函数中  $c$  取值为 0, 2, 4, 6;  $\delta$  的值为 1.2。

本文采用 Mamdani 模型的合成推理法来建立木材干燥模糊控制器的规则, 首先建立温度误差和温度误差变化率交运算的模糊关系; 然后求得模糊输出量的模糊关系, 即模糊控制器的控制规则。根据模糊变量的初始值及经过改进 back propagation (BP) 神经网络算法计算得出的模糊变量的调整值, 可以求出具体的模糊集合, 再根据合成推理法得到的模糊控制关系就能推理出输入—输出的模糊关系矩阵。

### 3 高频真空木材干燥的模糊神经网络控制方法

#### 3.1 模糊控制理论与神经网络的融合

模糊控制是通过模糊逻辑来模拟人类的思维方式处理实际系统中的控制问题, 这种模糊逻辑控

制系统在处理复杂性、不确定性、非精确的实际控制问题时具有明显优势<sup>[6]</sup>。模糊控制用模糊集合来描述客观存在的非确定性信息, 不依赖具体的数学模型, 但其变量隶属函数和模糊控制规则不具有动态调整性, 整个控制过程缺乏自学习能力, 从而影响控制效果<sup>[7]</sup>。

神经网络具有并行处理、自学习和较好的容错能力, 属于黑箱式的学习模式, 将其与模糊控制结合起来, 动态地调整模糊控制器的相关参数, 提高系统的控制性能<sup>[8]</sup>。

#### 3.2 模糊神经网络控制器设计

对木材干燥过程进行模糊控制时, 很难得到相对准确的模糊控制规则, 本文针对木材高频真空干燥过程提出了模糊神经网络控制方法。两者结合方式选用的是网络学习式, 利用 BP 学习算法动态地调整模糊控制器变量隶属函数的相关参数, 实现木材干燥系统的模糊自适应控制。木材干燥模糊神经网络控制系统方框图如图 2 所示。

学习算法选用的是 BP 算法, 通过 BP 网络的误差反向传播来调整模糊控制器模糊变量的隶属函数, 为模糊控制过程提供必要信息, 以使被控对象的输出逼近期望值<sup>[9]</sup>。模糊控制器采用的数学解析模型为

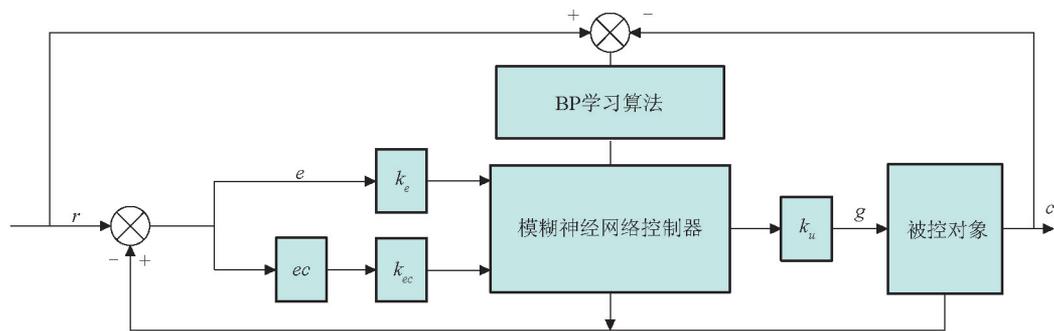


图 2 木材干燥模糊神经网络控制系统方框图

Fig.2 Block diagram of wood drying fuzzy neural network control system

注:  $k_e$  和  $k_{ec}$  为模糊神经网络控制器的比例因子;  $k_u$  为量化因子

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l [\prod_{i=1}^n \exp(-(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\delta_i^l})^2)]}{\sum_{l=1}^M [\prod_{i=1}^n \exp(-(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\delta_i^l})^2)]} \quad (2)$$

式(2)中,  $f(x)$  为单元输出;  $x_i$  为单元的第  $i$  个输入,  $i=1, 2$ ;  $\bar{y}^l$  为第  $l$  条规则的输出模糊集合的中心点;  $\bar{x}_i^l$  为第  $l$  条规则的输入的第  $i$  个语言变量索取的模糊集合的中心点;  $\delta_i^l$  为第  $l$  条规则的输入的第  $i$

个语言变量索取的模糊集合的宽度;  $l$  为规则条数,  $l=1, 2, 3, \dots, 35$ 。

自学习过程中的性能函数为

$$L = 0.5[r(t+1) - y(t+1)]^2 \quad (3)$$

式(3)中,  $L$  为性能函数的输出;  $r$  为被控对象的期望输出;  $y$  为被控对象的实际输出;  $t$  为自学习过程时间。神经网络的隐含层激励函数选取 Sigmoid 型

函数,输出层激励函数选为  $f_c(x)=x$ 。得到网络辨识的输出值为

$$\hat{y}_j = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^q w_{kj} f_h(w_{ik} x_i) \quad (4)$$

式(4)中,  $\hat{y}_j$  为输出层第  $j$  个节点的输出值;  $n$  为输入层节点个数;  $q$  为隐含层节点个数;  $w_{kj}$  为隐含层与输出层节点之间的连接权值;  $w_{ik}$  为输入层与隐含层节点之间的连接权值;  $x_i$  为输入层第  $i$  个节点的输入值。由于网络辨识出的输出值能准确地逼近实际输出,在学习过程中用网络辨识的输出值  $\hat{y}$

作为实际输出值来调整模糊控制器的相关参数。

## 4 模糊控制器和模糊神经网络控制器实验

### 4.1 模糊控制器仿真实验

仿真环境为 MATLAB7.0 SIMULINK。根据日本柳杉高频真空联合干燥实验的实验结果,将模糊控制器仿真中的给定温度设定为  $70\text{ }^\circ\text{C}$ ,初始温度设定为  $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,仿真时间定为  $120\text{ min}$ ,木材干燥模糊控制系统的仿真原理如图3所示,仿真输出结果如图4所示。

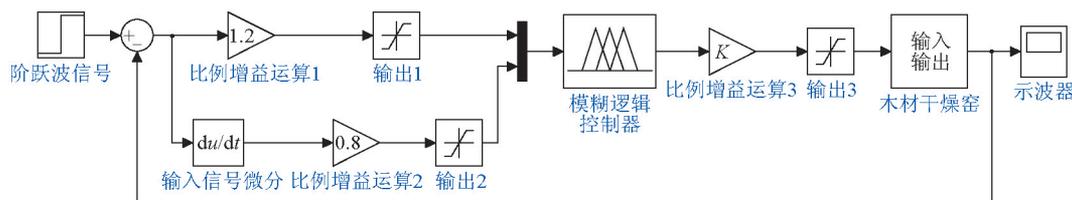


图3 木材干燥模糊控制器仿真模型

Fig.3 Simulation model of wood drying fuzzy controller

注:  $du/dt$  为输入信号进行微分运算过程;  $K$  为模糊逻辑控制器的输出参数增益

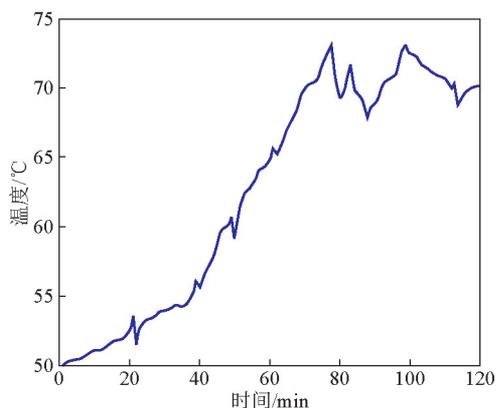


图4 模糊控制系统温度输出曲线

Fig.4 Temperature output curve of fuzzy control system

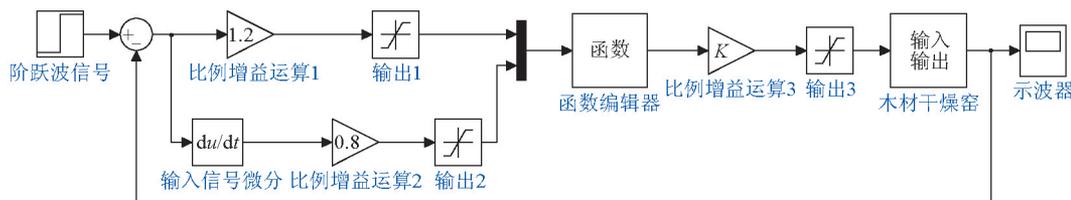


图5 木材干燥模糊神经网络控制器仿真模型

Fig.5 Simulation model of wood drying fuzzy neural network controller

从两种控制方法的仿真结果中可以看出,模糊控制的温度上升时间为  $80\text{ min}$  左右,调节时间接近  $120\text{ min}$ ,温度控制量的精度为  $\pm 2.5\text{ }^\circ\text{C}$ ;而模糊神经网络控制的温度上升时间为  $60\text{ min}$ ,调节时间

### 4.2 模糊神经网络控制器仿真实验

在模糊神经网络控制器的 MATLAB7.0 仿真试验中,本文采用 M 函数编辑器编写了木材干燥系统的模糊神经网络控制算法,并通过运行已经建立的 M 文件完成了整个仿真实验。

为便于实验对比,将模糊神经网络控制器的仿真条件与模糊控制的设定为一致,木材干燥模糊神经网络控制系统的仿真原理如图5所示,仿真输出结果如图6所示。

为  $85\text{ min}$ ,温度控制量的精度为  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。模糊神经网络的控制效果要比模糊控制精确,通过 BP 的自学习能力动态地调整模糊控制器的相关参数,提高了模糊控制精度,减小了温度调整时间。

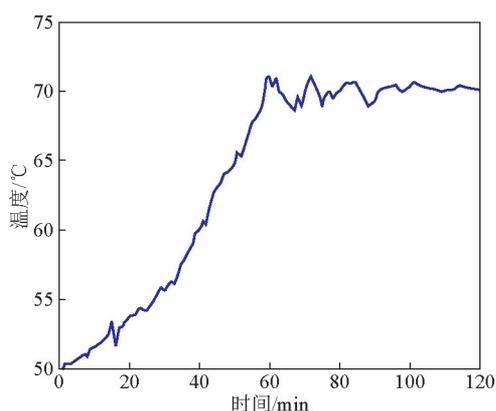


图6 模糊神经网络控制系统温度输出曲线  
Fig.6 Temperature output curve of fuzzy neural network control system

## 5 结语

高频真空联合木材干燥作为一种新型的联合干燥方式,具有干燥速度快、能源消耗低、环境污染小等优势。木材干燥过程具有非线性、时变性及复杂性等因素,传统的控制方法达不到高精度的控制需求。本文将神经网络理论与模糊控制相结合,利

用BP算法的自学习能力动态地调整模糊控制器中变量的隶属函数,使模糊控制器的控制输出量更为精确。基于已建的木材干燥模型进行了模糊控制器与模糊神经网络控制器的对比仿真实验,实验结果表明木材高频真空联合干燥的模糊神经网络控制器控制效果更好。

## 参考文献

- [1] 李 坚. 木材科学[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1994.
- [2] 何玲芝. 高频真空干燥木材的研究[J]. 东北林业大学学报, 1992, 20(3):49-53.
- [3] 小林功, 黑田尚宏, 久田卓兴, 等. 日本柳杉髓心方材干燥过程中的过热蒸汽预处理[J]. 日本木材工业, 2003, 58(6):258-263.
- [4] 李晓玲, 高瑞清, 构 涛, 等. 人工林落叶松髓心方材高频/真空干燥工艺研究[J]. 木材工业, 2010, 24(1):29-321.
- [5] Cronin K, Baucour P, Abodayeh K, et al. Probabilistic analysis of timber drying schedules [J]. Drying Technology, 2003, 21(8): 1433-1456.
- [6] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [7] 曹文华. 混沌优化的微波木材干燥模糊控制器的设计研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2010.
- [8] 李盼池, 李世勇. 基于量子遗传算法的正规模糊神经网络控制器设计[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3710-3714.
- [9] 曾光奇, 胡均安. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2006.

# Research on fuzzy neural network control method for high-frequency vacuum drying of wood

Jiang Bin, Sun Liping, Cao Jun, Zhou Zheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**[Abstract]** High-frequency vacuum combined wood drying is a kind of fast drying speed, low energy consumption, little environmental pollution of new drying technology. On the basis of theoretical analysis with high frequency in wood vacuum drying process, the fuzzy controller and fuzzy neural network controller of wood drying are designed in view of the neural network method to establish model of wood drying. The simulation experiment results show that fuzzy neural network control is better, such as the temperature rising fast, high control precision, good stability. The method to realize the automatic control of timber drying process has important research significance.

**[Key words]** high-frequency vacuum; wood drying; fuzzy neural network