

无菌包装预热系统温度控制方法研究

顾冬华, 周振

(郑州轻工业大学, 郑州 450000)

摘要: **目的** 为了提高无菌砖包设备预热系统温度控制精度, 设计一种温度控制器。**方法** 基于模糊神经网络算法设计一种温度控制器。在预热系统硬件结构的基础上, 建立被控对象数学模型。利用模糊控制的良好收敛性和对模糊量的运算优势, 以及神经网络自学习、自适应的特性, 将常规 PID 控制与模糊控制、神经网络结合起来, 提出一种基于模糊神经网络的 PID 控制策略, 以实现 PID 参数的实时在线整定。**结果** 试验结果表明, 与其他方法相比, 所述控制方法能够将温度超调从 2.6 °C 减小到 0.9 °C, 稳态偏差从 ± 1 °C 减小到 ± 0.4 °C。**结论** 该方法能够满足预热系统温度控制需求。

关键词: 无菌包装; 预热温度; 模糊神经网络; 参数整定

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)23-0162-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.23.024

Temperature Control Method of Aseptic Packaging Preheating System

GU Dong-hua, ZHOU Zhen

(Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT: The work aims to design a temperature controller, in order to improve the temperature control precision of the preheating system of aseptic brick bale equipment. A temperature controller was designed based on the fuzzy neural network algorithm. On the basis of hardware structure of the preheating system, the mathematical model of the controlled object was established. Taking advantage of the good convergence of fuzzy control and the operation advantage of fuzzy quantity, as well as the self-learning and self-adaptive characteristics of neural network, a PID control strategy based on fuzzy neural network was proposed by combining the conventional PID control with fuzzy control and neural network, so as to realize the real-time online tuning of PID parameters. Experimental results showed that, compared with other methods, the proposed control method could reduce the temperature overshoot from 2.6 °C to 0.9 °C, and the steady-state deviation from ± 1 °C to ± 0.4 °C. The proposed method can meet the requirement of preheating system temperature control.

KEY WORDS: aseptic packaging; preheating temperature; fuzzy neural network; parameter setting

对于无菌包装设备, 温度控制问题往往是针对封口前无菌纸盒的预热温度的控制^[1—3]。作为无菌砖包设备的关键技术, 预热温度控制至关重要, 直接决定产品封口质量。总体来说, 可用于无菌砖包的包装材料可分为 3 类, 即塑-铝、塑-纸、塑-塑^[4—5]。这些包装材料质地比较硬, 如果直接封口很难取得理想控制效果, 所以需要先将包装材料加热软化, 然后完成封

口^[6], 研究其预热温度控制具有一定的理论和实际意义。目前, 在无菌砖包设备中普遍使用基于 PID 算法的控制系统, 考虑到预热系统的时变性, 仅仅采用 PID 控制, 控制效果比较一般。为解决此问题, 诸多学者已经开始将智能控制算法与 PID 控制相结合, 以提高温度控制精度^[7—11]。其中神经网络控制和模糊控制是 2 种使用较多的算法, 二者互补能够取得更好的

收稿日期: 2019-06-11

作者简介: 顾冬华 (1973—), 男, 硕士, 郑州轻工业大学实验师, 主要研究方向为过程控制、嵌入式系统开发。

控制效果。例如,模糊控制主要依赖经验知识确定模糊集、隶属度函数和模糊规则,主观性非常强;相对而言,神经网络则可以弥补模糊控制的“主观”缺陷,利用其自身强大的自学习能力,在很大程度上削弱模糊控制的“主观性”,从而确保控制过程更加贴近实际情况^[12-14]。

文中以无菌砖包预热控制为研究对象,结合模糊控制和神经网络控制设计一种温度控制系统,同时介绍系统初始参数确定方法,并通过试验验证所述方法的可行性和有效性。

1 无菌砖包设备预热系统

1.1 系统简介

预热系统主要包括以下几个部分:进气阀、三相加热管、固态继电器、热电偶、温控模块、触摸屏、PLC、上位机等。PLC 是整个系统的控制核心,热电偶负责采集原始温度信号,温控模块则将所采集原始温度信号进行 A/D 转换,然后输入到 PLC 输入端。PLC 通过对比实际温度和设定温度得到温度偏差,并将其传送至上位机。上位机根据温度偏差,利用内部集成算法得到控制信号,然后传送至 PLC。PLC 根据控制信号实现蜂鸣器和固态继电器的控制,蜂鸣器表示系统运行出现错误;固态继电器则用于控制三相加热管。如果继电器导通,加热管工作,开启进气阀将热风吹向包材;如果继电器断开,加热管则停止工作。预热控制流程见图 1。

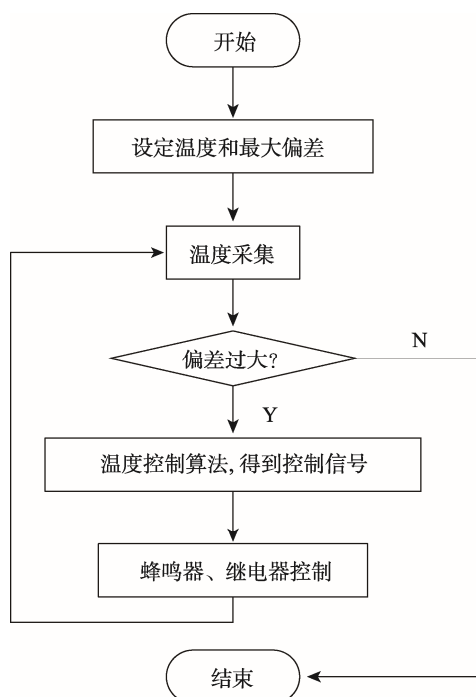


图 1 预热控制流程

Fig.1 Preheating control process

1.2 被控对象数学模型

考虑到预热温度控制比较复杂,为便于开展控制策略的研究,可将预热温控系统简化为一种纯滞后一阶惯性系统^[15],故其传递函数可表示为:

$$G(s) = \frac{K}{ts+1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: K 为静态增益; t 为时间参数; τ 表示滞后时间参数。

利用上述温控系统模型,施加阶跃响应并采集实验数据,通过一阶传递函数模型求解,可得到预热温度控制系统的传递函数:

$$G(s) = \frac{0.5}{50s+1} e^{-5s} \quad (2)$$

2 模糊神经网络控制器设计

2.1 模糊神经网络算法

根据 RBF 神经网络以及模糊理论,搭建了一种 4 层模糊神经网络结构,依次为输入层、模糊化层、模糊推理层以及输出层,结构见图 2。

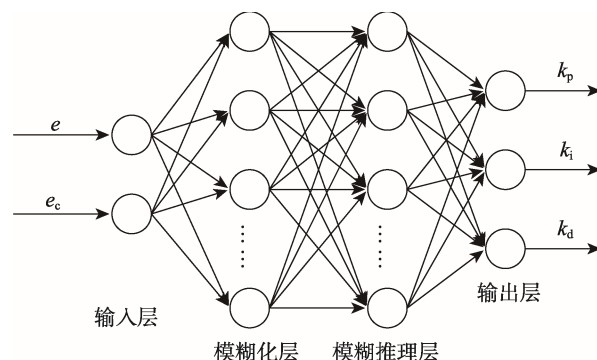


图 2 模糊神经网络结构

Fig.2 Fuzzy neural network structure

由于被控对象为预热系统温度,所以模糊神经网络的输入量为温度偏差 e 和温度偏差变化率 e_c ,二者可定义为:

$$\begin{cases} e(n) = r(n) - y(n) \\ e_c(n) = e(n) - e(n-1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r(n)$ 为设定温度数值; $y(n)$ 为实际温度数值; $e(n)$ 和 $e(n-1)$ 分别为 nt 和 $(n-1)t$ 时刻温度偏差数值,定义模糊推理函数为:

$$f_2(i, j) = \exp \left\{ -\frac{[f_1(i) - c_{ij}]^2}{\sigma_{ij}^2} \right\} \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 表示第 i 个输入变量对于第 j 个模糊集合函数的宽度; c_{ij} 表示第 i 个输入变量隶属于第 j 个模糊集合的中心位置。

基于适应度,针对模糊推理规则对应节点进行配对,可以得到:

$$f_3(j) = \prod_{i=1}^N f_2(i, j) \quad (5)$$

式中: $N = \prod_{i=1}^N N_i$, N_i 表示输入变量的模糊分割数。

输出层对应 k_p, k_i, k_d 的整定结果,输出层的输出可表示为:

$$f_4 = f_3 \cdot W = \sum_{j=1}^N f_3(j) \cdot w(j, i) \quad (6)$$

式中: W 表示连接权矩阵。

系统控制器可表示为:

$$\Delta u(k) = f_4 \cdot xc = k_p xc(1) + k_i xc(2) + k_d xc(3) \quad (7)$$

式中: $k_p = f_4(1)$, $k_i = f_4(2)$, $k_d = f_4(3)$; $xc(1) = e(k)$, $xc(2) = e(k) - e(k-1)$, $xc(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$ 。

文中选择增量式 PID 算法用于预热系统温度控制,则有:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (8)$$

如果以预热温度偏差的累积作为评价函数,对控制效果进行评价,那么可以得到连接权 w_{ij} 、中心函数 c_{ij} 和宽度函数 σ_{ij} 的表达式:

$$\begin{cases} w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \alpha [w_{ij}(k-1) - w_{ij}(k-2)] \\ c_{ij}(k) = c_{ij}(k-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} + \alpha [c_{ij}(k-1) - c_{ij}(k-2)] \\ \sigma_{ij}(k) = \sigma_{ij}(k-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} + \alpha [\sigma_{ij}(k-1) - \sigma_{ij}(k-2)] \end{cases} \quad (9)$$

式中: η 表示学习速率; α 表示惯性系数,且满足 $0 < \alpha < 1$ 。定义网络拟合误差为 e_i , 其满足:

$$e_i = y_i - \sum_{j=1}^M f_2(X_i, c_j, \sigma_j) w_j \quad (10)$$

式中: y_i 表示网络期望输出; $X_i = (x_{i1}, x_{i2} \cdots x_{in})^T$, M 为输出样本。如果假设累积方差贡献率为 ρ_i , 那么则有:

$$\rho_i = \sum_{j=1}^i e_j > \rho \quad (11)$$

式(11)表明,网络拟合误差 e_i 累积到设定值 ρ 时,算法迭代终止并输出权值矩阵。

2.2 参数初始值确定

参数初始值选择直接影响神经网络在训练过程中的收敛速度,决定了网络的实际训练效果。通常情况下,神经网络初始值的选择多为随机数,选择依据往往是经验或通过试验确定,这种参数选择方式很难取得理想控制效果。为解决此问题,文中选用

K-means 方法对神经网络训练样本进行单一种类聚类,进而确定神经网络内部隐含层神经元个数和参数初始值。这样便可以提高神经网络训练速度,改善逼近效果。

定义训练样本个数为 n , 单个训练样本的数据维数为 d , 样本种类为 k , 那么样本集合可表示为:

$$\begin{cases} X = \{X_1, X_2 \cdots X_n\} \\ X_i = (x_{i1}, x_{i2} \cdots x_{id})^T \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 $i=1, 2 \cdots n$ 。通过 K-means 的层次聚类处理得到单一聚类 Z , 具体表达式为:

$$Z = \{Z_1, Z_2, \cdots, Z_l\} (k \leq l \leq n) \quad (13)$$

式(13)中每个聚类所对应样本种类可描述为 $K = \{K_1, K_2 \cdots K_l\}, K_i \in \{1, 2 \cdots k\}$ 。

对于任意的 $Z_i \in Z (1 \leq i \leq l)$, $Z_i = \{X_1^{(i)}, X_2^{(i)} \cdots X_{n_i}^{(i)}\}$, $X_k^{(i)} = (x_{k1}^{(i)}, x_{k2}^{(i)} \cdots x_{kd}^{(i)})^T$, 通过计算可得 Z_i 聚类的各维数据的中心和半径, 即:

$$\begin{cases} o_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n_i} x_{kj}^{(i)} \\ b_{ij} = \frac{\max \{x_{kj}^{(i)} - o_{ij}\} + \min \{x_{kj}^{(i)} - o_{ij}\}}{2} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)计算结果分别对应隐含层神经元个数、各节点基宽和中心, 即:

$$\begin{cases} m = l \\ c_{ij} = o_{ij} \\ b_{ij} = \sigma_{ij} \end{cases} \quad (15)$$

3 试验验证

为验证所述温度控制方法的实际效果,分别采用模糊 PID 控制、神经网络 PID 控制和文中所述控制方法,在无菌包装设备中进行预热温度控制试验,采集加热过程进行温度数据。试验平台结构见图 3。

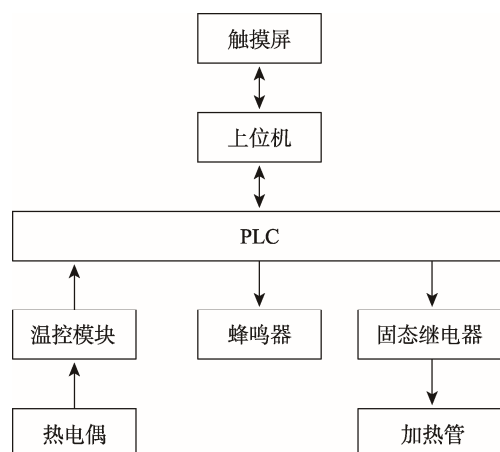


图3 试验平台结构

Fig.3 Test platform structure

以温度超调量、加热时间、稳态偏差为依据，评判控制方法优劣。试验过程中设定最大温度误差为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。评价指标见图 4。试验结果见表 1。

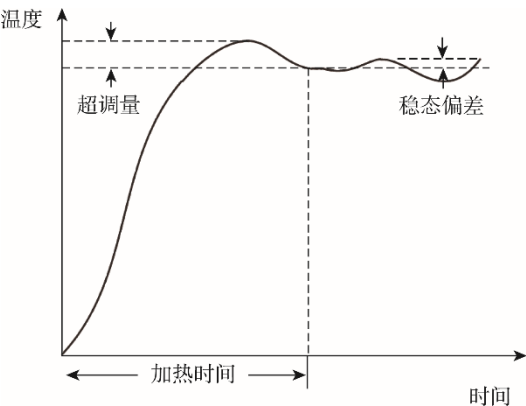


图 4 评价指标示意
Fig.4 Evaluation index diagram

表 1 对比结果
Tab.1 Comparison results

项目	目标温度/ ℃	超调量/ %	加热时间/s	稳态误差/ ℃
模糊 PID 控制	110	2.6	108	± 1
神经网络 PID 控制	110	1.9	102	± 1.2
文中控制方法	110	0.9	98	± 0.4

以文中所述温度控制方法为研究对象，针对不同预热温度分别进行试验，采集试验数据并求平均值，结果见表 2。

表 2 试验结果
Tab.2 Test results

设定温度/ $^{\circ}\text{C}$	实际温度/ $^{\circ}\text{C}$	误差/ $^{\circ}\text{C}$	响应时间/s
50	50.3	0.3	90
60	59.6	- 0.4	92
70	70.4	0.4	95
80	79.6	- 0.4	95
90	90.9	0.9	97

从试验结果可以看出：所述控制方法的温度控制效果最好，与其他 2 种方法相比，温度超调从 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减小到 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，稳态偏差从 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减小到 $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，试验过程中，最大误差仅有 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

试验过程中发现，由于系统具有更好的自适应、自学习能力，虽然控制算法复杂程度有所增加，但没有降低系统响应时间，基本接近模糊 PID 算法和神经网络 PID 算法。所述控制方法能够满足无菌砖包设备预热需求。

4 结语

以无菌砖包预热系统温度控制为研究对象，为提高温度控制精度以及系统响应时间，基于模糊神经网络设计了一种预热温度控制系统。所述控制系统能够在线实时调节 PID 控制关键参数，同时利用 K-means 聚类方法实现神经网络初始参数确定。试验结果表明，所述控制方法的温度控制效果最好，最大误差仅有 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，能够满足无菌砖包设备预热需求。

参考文献：

[1] 潘玉成, 刘宝顺, 黄先洲, 等. 茶叶杀青机模糊 RBF 神经网络 PID 温控系统设计与试验[J]. 茶叶科学, 2019, 39(2): 139—149.
PAN Yu-cheng, LIU Bao-shun, HUANG Xian-zhou, et al. Design and Experiment of the Temperature Control System of the Fuzzy RBF Neural Network PID in Tea Fixing Machine[J]. Journal of Tea Science, 2019, 39(2): 139—149.

[2] 罗帆, 张云, 崔树标, 等. 规则自组织模糊 PID 注塑机料筒温度控制[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(6): 65—69.
LUO Fan, ZHANG Yun, CUI Shu-biao, et al. Self-Organizing Fuzzy PID Controller for Injection Molding Machine Cylinder Temperature[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(6): 65—69.

[3] 蒋正炎. 模糊神经网络 PID 算法在塑料挤出机智能控制中的应用[J]. 塑料工业, 2019, 47(3): 69—72.
JIANG Zheng-yan. Application of Fuzzy Neural Network PID Algorithm in Intelligent Control of Plastic Extruder[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(3): 69—72.

[4] LASRI R, ROJAS I, POMARES H, et al. A New Adaptive and Self-organizing Fuzzy Policy to Enhance the Real-time Control Performance[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2014, 7(3): 582—594.

[5] 冉育强, 李军, 杨军. 基于 PLC 的环境模拟系统温度控制算法的研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(10): 3377—3380.
RAN Yu-qiang, LI Jun, YANG Jun. Research and Implementation of Temperature Control Algorithm for Environment Simulation System Based on PLC[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(10): 3377—3380.

[6] 吕俊亚. 一种基于单片机的温度控制系统设计与实现[J]. 计算机仿真, 2012, 29(7): 230—233.
LYU Jun-ya. Design and Implementation of Temperature Controlling System Based on Single Chip[J]. Computer Simulation, 2012, 29(7): 230—233.

[7] 郭小和, 刘科, 周继强, 等. 基于改进遗传算法的神经元自适应 PID 控制[J]. 南昌航空大学学报(自

- 然科学版), 2012, 26(4): 14—18.
- GUO Xiao-he, LIU Ke, ZHOU Ji-qiang, et al. Single Neuron Adaptive PID Control Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2012, 26(4): 14—18.
- [8] 王全刚, 程良伦, 李锦棠. 基于模糊神经网络 PID 的塑料薄膜厚度控制系统设计[J]. 机床与液压, 2016, 44(14): 145—148.
- WANG Quan-gang, CHENG Liang-lun, LI Jin-tang. Design of Plastic Film Thickness Control System Based on Fuzzy Neural Network PID[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(14): 145—148.
- [9] 尹亮, 宫文宁. 模糊自适应 PID 控制算法分析[J]. 变频器世界, 2011(9): 86—88.
- YIN Liang, GONG Wen-ning. Analysis of Fuzzy Adaptive PID Control Algorithm[J]. The World of Inverters, 2011(9): 86—88.
- [10] 付光杰, 张微微, 牟海维. 基于模糊 RBF 网络高频感应加热电源控制的研究[J]. 化工自动化及仪表, 2014, 41(4): 357—361.
- FU Guang-jie, ZHANG Wei-wei, MU Hai-wei. Control of High-frequency Induction Heating Power Based on Fuzzy RBF Neural Network[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2014, 41(4): 357—361.
- [11] 王华强, 石亚娟, 王健波. 神经网络模糊 PID 在水轮机调速系统中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(9): 1187—1191.
- WANG Hua-qiang, SHI Ya-juan, WANG Jian-bo. Application of Neural Network Fuzzy PID in Turbine Governor System[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2012, 35(9): 1187—1191.
- [12] 潘玉成, 林高飞, 陈小利, 等. 基于模糊专家控制的茶叶炒制温度控制系统[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 79—84.
- PAN Yu-cheng, LIN Gao-fei, CHEN Xiao-li, et al. Tea Frying Temperature Control System Based on Fuzzy Expert Control[J]. Food & Machinery, 2016, 32(11): 79—84.
- [13] 胥良, 郭林, 梁亚, 等. 基于模糊 RBF 神经网络的智能 PID 控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(6): 67—69.
- XU Liang, GUO Lin, LAING Ya, et al. Study on Intelligent PID Control Based on Fuzzy RBF Neural Network[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2015(6): 67—69.
- [14] 李家荣. 高精度温度控制系统的设计及应用研究[J]. 量子电子学报, 2016, 33(5): 614—617.
- LI Jia-rong. Design and Application of High Precision Temperature Control System[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2016, 33(5): 614—617.
- [15] 王斌, 石秀东, 李进, 等. 基于单神经元的 PID 无菌包装预热控制技术[J]. 轻工机械, 2018, 36(3): 62—66.
- WANG Bin, SHI Xiu-dong, LI Jin, et al. Preheating Control Technology for PID Aseptic Packaging Based on Neuron[J]. China Plastics Industry, 2018, 36(3): 62—66.