

基于模糊参数整定的带式烘干机湿度自适应控制系统设计及应用

史 狄¹, 孙吉华², 朱佳彬¹, 梁延刚², 陆正卿¹, 陈煜华², 李 超³

(1. 上海烟草集团有限责任公司, 上海 200082; 2. 颐中(青岛)烟草机械有限公司
山东 青岛 266021; 3. 青岛大学自动化学院 山东 青岛 266071)

摘要:在带式烘干机干燥物料过程中,出口物料水分含量易受温度、湿度多个因素的影响,导致 Proportional - Integral - Derivative (PID) 湿度控制算法参数整定困难。为提高带式烘干机自动化水平,保证出口物料的质量,该文基于模糊径向基函数神经网络设计了一种湿度自适应控制方案,确保出口物料水分含量稳定于设定值。将物料含水量和烘箱温度作为特征变量输入模糊系统,实现了 PID 控制参数的自适应整定。径向基函数神经网络与模糊系统的结合,在降低模糊推理复杂度的同时增加了算法的自学习能力。仿真分析及实验结果表明,该文所提控制方案能保证出口物料水分含量稳定于设定值,可有效提高带式烘干机湿度控制系统的自动化水平。

关键词:带式烘干机;湿度控制;模糊控制;神经网络;自适应控制

中图分类号: TP23

文章编号: 1000 - 0682 (2025) 01 - 0079 - 04

文献标识码: A

DOI: 10. 19950/j. cnki. CN61 - 1121/TH. 2025. 01. 014

Fuzzy parameters tuning based belt dryer humidity adaptive control system design and application

SHI Di¹, SUN Jihua², ZHU Jiabin¹, LIANG Yangang², LU Zhengqing¹, CHEN Yuhua², LI Chao³

(1. Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 2. Etsong (Qingdao) Tobacco Machinery Co., Ltd., Shandong Qingdao 266021, China; 3. School of Automation, Qingdao University, Shandong Qingdao 266071, China)

Abstract: In the belt drying process, achieving a consistent moisture content in the output materials is challenging due to various factors such as temperature and humidity fluctuations. This variability complicates the parameterization of the Proportional - Integral - Derivative (PID) humidity control algorithm. To enhance the automation of belt dryers and ensure consistent material quality, this study proposes a humidity adaptive control scheme based on the fuzzy radial basis function neural network. This scheme aims to stabilize the moisture content of the output materials at a desired level. The proposed control scheme incorporates the moisture content of the material and the oven temperature as input variables into a fuzzy system. This system facilitates adaptive adjustment of PID control parameters. By integrating the radial basis function neural network with the fuzzy system, the algorithm's self-learning capability is enhanced while reducing the complexity of fuzzy inference. The effectiveness of the proposed control scheme in maintaining the moisture content of the output material at the desired level is verified by simulation analysis and experimental results. The automation level of belt dryer control systems can be significantly improved through the adoption of this approach.

Keywords: belt dryer; humidity control; fuzzy control; neural network; adaptive control

收稿日期: 2024 - 06 - 24

第一作者: 史狄(1987—),男,汉族,上海人,硕士,工程师,研究方向为机械设备。

0 引言

干燥是食品、化工、建材等工业品生产制造的一个重要环节,产品水分含量不仅影响后续工艺步骤

加工效率,还关乎最终成品质量和产量。带式烘干机因其操作连续性好、生产效率和热能利用率高等优势,被广泛应用于食品、烟叶、木材、精细化工产品等干燥处理^[1]。然而,通过人工调节烘干机湿度控制系统,存在主观性高、控制精度低、质量波动大等问题。为提高生产效率,降低生产成本,现代工业设备逐渐向集成化、智能化发展。研究带式烘干机先进控制技术,提高其自动化水平,对促进物料干燥处理行业转型升级具有重要意义^[2-3]。

数十年以来,物料烘干湿度控制研究取得了较大的进展^[4-6]。针对传统 Proportional - Integral - Derivative (PID) 算法在时变和滞后条件下的动态控制精度差和参数整定困难问题^[4],学者将模糊等先进控制技术应用于温湿度控制。考虑梗丝流化床干燥控制问题,文献[5]结合模糊理论与 PID 控制算法提出了一种湿度控制方案。基于 Bang - Bang 控制理论,文献[6]给出了风干区温度控制方法。依托熔盐实验装置,文献[7]研究了模糊 PID 温度控制在熔盐回路系统的应用。然而,尽管模糊控制可应用于非线性和模糊性强、建模复杂的被控对象,但其模糊推理环节计算较慢。高性能控制系统除了稳定性,还需要具备快速响应能力。由于神经网络出色的非线性映射能力,将其与模糊系统结合可以提高算法的实时性和自学习能力。文献[8]利用模糊径向基函数神经网络设计的温度控制算法,实现了站台门良好的温度控制效果。文献[9]给出了一种模糊径向基函数神经网络温度控制算法,提高了温湿度试验箱的控制精度。值得指出的是,虽然模糊径向基函数神经网络控制已经得到了初步研究,但多数仍处于理论或仿真阶段,且将其应用于带式烘干机湿度控制研究仍然较少。由于带式烘干机整体跨度大,且入口物料水分含量及外界温度无法恒定,使得物料干燥过程具有延迟性和易受多种因素影响等特点,设计确保系统能够快速、准确地响应变化,保证出口物料水分含量稳定的自适应控制策略具有一定挑战性。

该文针对带式烘干机提出了一种模糊控制和径向基函数神经网络相结合的自适应 PID 湿度控制方案,实现了对烘干机出口物料湿度的精确控制,保证出口物料水分含量稳定于设定值附近。采用模糊径向基函数神经网络自适应调整 PID 控制参数,避免了传统 PID 控制算法参数整定困难的问题;引入径向基函数神经网络降低了模糊推理复杂度。仿真研究及实际生产数据,验证了所提方案的有效性。

1 带式烘干机总体设计

1.1 烘干工艺流程

带式烘干机主要由进出料装置、传送带、烘箱和控制系统组成。如图 1 所示干燥工艺流程,高含水量物料通过进料装置输入烘干机,随后受烘箱产生的热辐射的加热和蒸发作用逐渐降低水分。经由多个相同的工艺流程干燥处理后,最终得到干燥的物料。带式烘干机湿度控制系统组成如图 2 所示,干燥前后的物料含水量,烘箱温度,蒸汽温度、流量、压力,阀门开度等由传感器采集并经变送器和模数转换处理后发送至控制器。干燥后的物料水分含量关乎最终产品质量和生产效率,并且还直接影响到设备的运行和生产安全。因此,稳定、高效的湿度控制系统至关重要。

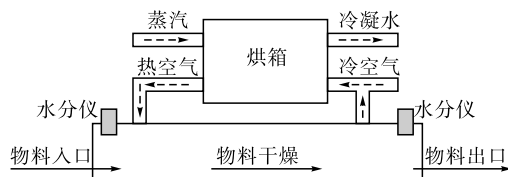


图 1 带式烘干机工艺流程

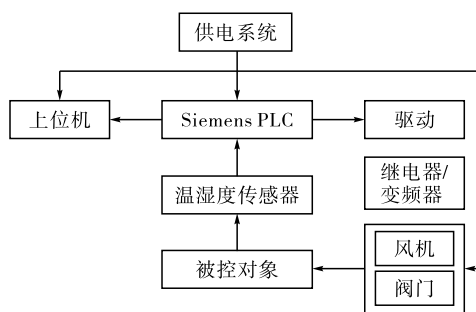


图 2 烘干机湿度控制系统组成

1.2 物料湿度检测

湿度自动控制的实现基于测量和采集的物料湿度信息。通过在烘干机入口和出口分别布设水分仪,出入口物料水分值分别被采集并传送至控制器。控制器将根据出口物料水分与设定值的误差以及入口物料水分值调整蒸汽流量,从而改变输入烘箱的热量,进而控制出口物料水分含量稳定于预设值。湿度检测的原理是水分对特定波长红外线的选择性吸收特性。水分仪发射近红外光通过分光器,一部分光束转发到二次检测器上形成参考信号。另外一部分反射至被测物上,反射光中特定波长的近红外光经过被测物中的水分吸收后,再采集至二次检测器上,和参考光源信号进行比对并生成它响应成比例变化的线性输出,从而测量并采集物料水分含量。

2 物料湿度智能控制

烘箱中的热空气温度是决定出口物料水分含量能否保持在设定值的主要因素,物料干燥情况会随着烘箱温度发生变化。在进料量恒定的情况下,通过改变蒸汽阀门开度等调节进入每个烘箱中热空气的流量,可以实现对出口物料水分的调节。

2.1 控制器结构设计

本节基于模糊径向基函数神经网络技术和 PID 控制算法,设计一种物料湿度自适应控制方案。模糊径向基函数神经网络,是模糊控制系统和径向基函数神经网络的结合。把神经网络的能力融入到模糊系统中,在实现 PID 参数的自整定的同时提高模糊推理速度。

设计思路为将出口物料水分含量与设定值的差值、入口物料水分含量和烘箱温度作为模糊径向基函数神经网络的输入变量,经过模糊化和模糊推理后输出 PID 控制参数,实现 PID 控制参数整定,进而调整阀门开度,保证出口物料水分含量稳定于设定值。控制框图如图 3 所示。

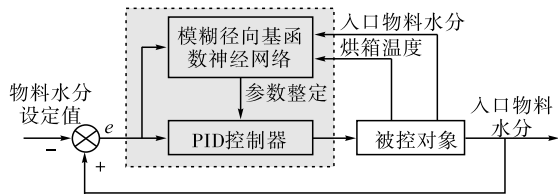


图 3 径向基函数神经网络 PID 湿度控制框图

2.2 控制参数整定

根据控制器结构,构造如下图 4 所示模糊径向基函数神经网络。

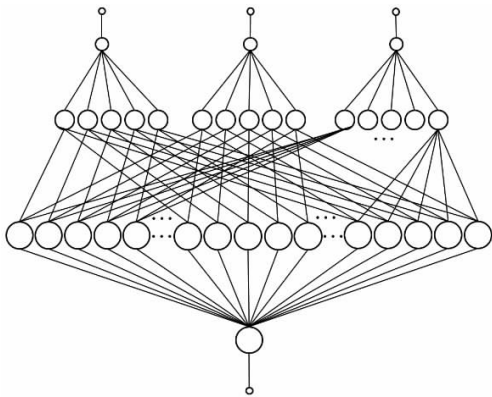


图 4 模糊径向基函数神经网络结构

令 $x_1 = e = h_o - h_d$, $x_2 = h_i$, $x_3 = c$ 表示 3 个输入特征,其中 h_i 和 h_o 分别代表入口和出口物料水分含量, h_d 代表期望水分含量设定值, c 为烘箱温度。模糊化层每个输入特征各对应 5 个节点,表示分别

将输入特征模糊化并划分到 5 个模糊集合中,模糊化函数如下:

$$\lambda_{i,j}^{j_i}(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - m_{i,j})^2}{2\sigma_{i,j}^2}\right) \quad (1)$$

其中, $m_{i,j}$ 是 x_i 的模糊中心, $\sigma_{i,j}$ 代表高斯函数标准差, $i = 1, 2, 3$, $j_i = 1, 2, \dots, 5$ 。模糊推理层每个节点代表一条规则,规则的适用度由下式计算:

$$r_l = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 f_{i,j_i}^{j_i}(x_i) \quad (2)$$

其中, $l = 1, 2, \dots, j_i^2$ 。输出层设计有三个节点,经过模糊径向基函数神经网络训练得到 PID 控制参数,计算如下:

$$k_c = \sum_{l=1}^{j_i^2} \omega_{c,l} \frac{r_l}{\sum r_l} \quad (3)$$

其中, $c = 1, 2, 3$, $\omega_{c,l}$ 是模糊推理层和输出层间的连接权重。则输出层的输出可作为 PID 控制器参数,即 $k_p = k_1$, $k_i = k_2$, $k_d = k_3$ 。

由于物料的含水量是时变和非线性的,需要通过学习在线调整权重 $\omega_{c,l}$,更新模糊控制隶属度函数的中心和宽度,减小误差。对于网络采集到第一个输入特征时输出层第 n 个输出节点的实际输出 $y_{m,n}$ 及其期望值 $y_{m,n}^d$,定义如下目标函数 $P = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^3 (y_{m,n} - y_{m,n}^d)$,为使目标函数最小,采用梯度下降法设计如下权重更新律:

$$\omega_{n,j}(t) = \omega_{n,j}(t-1) - \delta \frac{\partial E}{\partial \omega_{n,j}(t-1)} + \gamma(\omega_{n,j}(t-1) - \omega_{n,j}(t-2)) \quad (4)$$

$$c_{j,i}(t) = c_{j,i}(t-1) - \delta \frac{\partial E}{\partial c_{j,i}(t-1)} + \gamma(c_{j,i}(t-1) - c_{j,i}(t-2)) \quad (5)$$

$$v_{j,i}(t) = v_{j,i}(t-1) - \delta \frac{\partial E}{\partial v_{j,i}(t-1)} + \gamma(v_{j,i}(t-1) - v_{j,i}(t-2)) \quad (6)$$

其中, $\omega_{n,j}(t)$ 代表在第 t 次迭代中第 n 个输出节点和第 j 个隐层间的调整权重, $c_{j,i}(t)$ 和 $v_{j,i}(t)$ 则分别表示在第 t 次迭代中第 j 个输出层和第 i 个隐层间的中心分量和节点与中心分量的长度; δ 和 γ 分别为算法的学习和动量因子。

3 仿真分析及实验验证

3.1 仿真分析

由于入口物料水分含量及外界温度变化等因素,使得出口物料湿度呈现出非线性、多变量耦合等

特点,需要设计自适应控制策略以确保系统能够快速、准确地响应变化,保证出口物料水分含量的稳定。考虑烘干机整体距离长,且物料经过多个烘箱水分逐步降低并最终稳定至设定值,受文献[10]启发并经多次试验,整个烘干过程可采用二阶振荡环节附加滞后环节描述,具体传递函数如下:

$$G(s) = \frac{e^{-\tau s}}{c_2 s^2 + c_1 s + c_0} = \frac{e^{-\tau s}}{s^2 + 12s + 1} \quad (7)$$

其中, s 为复变量; τ 为延迟时间。

首先,根据上述等效系统,在 Matlab 中搭建模糊径向基函数神经网络 PID 控制算法和仿真模型, x_1 、 x_2 和 x_3 分别设 5 个模糊子集, $\delta = 0.4$, $\gamma = 0.02$ 。当物料湿度设定值为 10 时,物料水分设定值和出口物料水分含量曲线如图 5 所示。

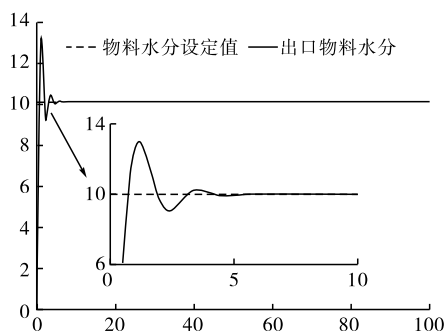


图5 物料水分设定值和出口物料水分含量

通过仿真可以看出,出口物料水分含量始终稳定在设定值左右,且误差保持在较小的范围,验证了该文所提湿度控制算法的有效性。

3.2 实验验证

为验证该文所提控制策略的实用性,将其应用于图6所示的某卷烟厂辊压法薄片试验线进行烟草薄片烘干测试。实验环境温度 20 ~ 25 °C,空气相对湿度 40% ~ 50%。在运行过程中可根据实际情况,设置当前标准薄片的厚度、允许偏差范围、采样精度和采样间隔等参数。本实验每秒采集 1 个数据。共采集了 4881 个数据,其中中间一段为无薄片进入烘干机。为便于表示,将前后两段薄片干燥过程分别记为 1 阶段和 2 阶段。入口和出口烟草薄片水分含量、出口烟草薄片水分含量方差分别如图 7 和图 8 所示。



图6 某卷烟厂辊压法薄片试验线

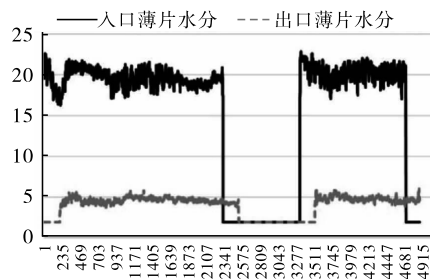


图7 入口和出口烟草薄片水分含量

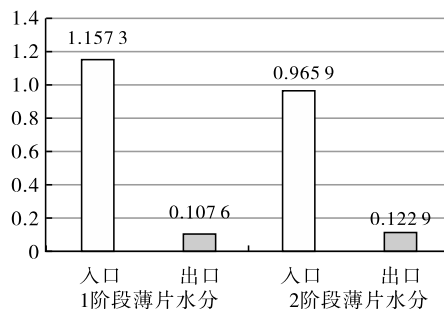


图8 烟草薄片水分含量方差

从图7和图8可以看出,尽管入口烟草薄片的水分含量变化波动,设计的算法都可以自适应调节,确保出口烟草薄片的水分含量稳定于设定值附近。出口薄片水分含量方差 0.1 ~ 0.13,较小的方差表明该文所提方法可以良好的调整烟草薄片水分含量。上述结果验证了该文所提控制策略的实用性和良好的工业应用前景。

4 结束语

针对带式烘干机物料湿度控制问题,该文提出了一种模糊径向基函数神经网络 PID 自适应湿度控制算法。将模糊算法与径向基函数神经网络结合实现了 PID 算法参数的自适应整定,引入的径向基函数神经网络降低了模糊推理的复杂度。通过仿真分析及应用于某型辊压法薄片试验线进行烟草薄片烘干实验,结果表明该文所提控制方案能保证出口物料水分含量稳定于设定值,可有效提高带式烘干机湿度控制系统的自动化水平。

参考文献:

- [1] 胡斌. 带式连续烘干机的设计和研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2014.
- [2] 郭晓莹,何其文,谭雨祺. 基于 S7-1200PLC 的粮仓温湿度远程监控系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(05): 39-41.
- [3] 杨晓珍. 谷物烘干机自动化控制技术分析及创新发展方向研究[J]. 南方农机, 2021, 52(16): 50-52.

(下转第 110 页)

速度和精确控制方面的问题。通过改进电机梯形加减速算法并利用 FPGA 的硬件优势,实现了对多个步进电机的分别控制,系统在测试和使用中显示出了极高的稳定性和精确度,频率误差保持在 1% 以内,可以得知该平台有效避免了失步和过冲现象。

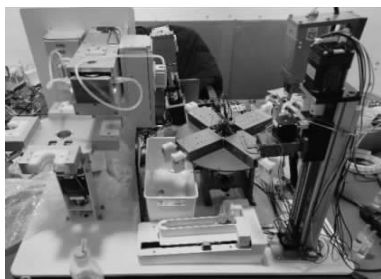


图 15 电机精密控制实验平台

采用梯形加减速算法优化和 FPGA 硬件实现的结合,提升了控制的响应速度,确保了控制的精确性,并通过上位机进行通信部署。这对前人使用单一处理器,未使用控制算法的研究提出了有效的修正和补充。该系统的多路控制能力,精确控制和灵活可编程性在自动化设备上。诸如机器人技术和精密仪器控制中展现了较高的应用价值。

但是该设计仍然存在一定的局限性。未来的研究方向可以包括引入更加先进的加减速控制策略,如 S 型或指数型加减速算法,从而进一步的提高控制性能和系统的响应速度。另外,还可以引入基于人工智能的控制策略,利用机器学习算法优化控制参数,也是提高智能化的重要方向。之后将会进一步探索步进电机精密控制平台与其他系统(视觉系统,传感器系统)的集成,构成性能更佳的复杂自动

化控制系统^[10]。

该研究通过对梯形加减速算法的优化和 FPGA 的应用,显著提高了多路步进电机控制系统的性能,为相关领域提供了重要的理论和实际指导,同时也指明了未来的研究方向和应用拓展的可能性。

参考文献:

- [1] 张华西,陈佳宇,刘卿卿,等. FPGA 的多通道步进电机控制系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023 (03): 77-81.
 - [2] 侯俊杰,赵宇,李孟委. 基于 Zynq 的步进电机控制系统[J]. 国外电子测量技术, 2021(3): 108-112.
 - [3] 邱靖超. 基于 FPGA 的步进电机多轴运动控制系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2021.
 - [4] 刘雪梅,王卫军. 基于嵌入式的步进电机远程控制技术[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(7): 76-79.
 - [5] 冯涛,李擎,潘月斗,等. 步进电机梯形加减速曲线规划控制实验系统设计[J]. 煤矿机械, 2020, 41(7): 23-25.
 - [6] 王邦继,杨沛鑫,刘庆想,等. 一种基于多处理器片上系统的多轴伺服驱动控制器: CN109600075B[P]. 2019-04-09.
 - [7] 朱梦雅,毛玉蓉,谢兴兵. 电容式锅炉液位测量系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(2): 37-41.
 - [8] 刘佳. 基于 DSP + FPGA 的雷达伺服控制器的设计与开发[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
 - [9] 岳梦云,白冰. 一种电机 FOC 算法 DSP 系统设计与实现[J]. 电子学报, 2020, 48(10): 2041-2046.
 - [10] 杨九林,朱建公,廖璇,等. 直流无刷电机 S 曲线加减速控制算法及其实现[J]. 机床与液压, 2020, 48(23): 160-165.
-
- (上接第 82 页)
- [4] 卫晓娟,蒋兆远. 烘干炉温度控制系统设计[J]. 兰州交通大学学报, 2007(01): 26-28.
 - [5] 戴滔. 基于 PLC 的模糊-PID 控制在梗丝流化床干燥控制系统中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
 - [6] 强明辉,马文学,马永伟. 基于 S7-200 改进 Bang-Bang 控制算法在温度控制中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2013(06): 97-99.
 - [7] 阮见,邹杨,朱海华,等. 模糊控制在熔盐系统温度控制中的应用[J]. 核动力工程, 2018, 39(01): 106-111.
 - [8] 周超,李樊,杜呈欣,等. 基于模糊 RBF 神经网络的轨道交通站台门预热控制技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(06): 101-104.
 - [9] 石书培,褚建新,周贤文. 基于神经网络补偿的温湿度试验箱模糊解耦控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2018(05): 67-70+84.
 - [10] 赵亮,陈惠贤,姚运萍. 基于 Smith-模糊 PID 的风干区温度控制系统设计[J]. 控制工程, 2023. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20221108.