

基于模糊神经网络 PID 控制的粉体 包装计量控制系统

Powder packaging measurement control system based on
fuzzy neural network PID control

王 艳 陈 静 王志山 李昆祥 徐 芸 徐雪萌

WANG Yan CHEN Jing WANG Zhi-shan LI Kun-xiang XU Yun XU Xue-meng

(河南工业大学, 河南 郑州 450001)

(Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:针对粉体包装计量控制系统由于传感器、螺杆的旋转惯性、零点漂移,下料冲击力等因素的影响而造成的系统延迟、非线性等问题,提出一种基于模糊神经网络 PID 控制粉体包装计量控制系统。利用模糊神经网络良好的动态控制特性和自学习能力来调整 PID 控制比例、积分、微分 3 个调整参数。借助 MATLAB simulink 仿真软件进行系统的模拟仿真。结果表明,该模糊神经网络 PID 控制系统稳定时间能缩短约 45%,超调量约减少 16%。由此可得模糊神经网络 PID 控制系统优于传统的 PID 控制系统。

关键词:粉体包装; 计量系统; 模糊神经网络; PID 控制; MATLAB simulink

Abstract: The work aims to the delay and nonlinearity of powder packaging metering control system caused by sensor, screw rotation inertia, zero drift, cutting impact and other factors, the powder packaging metering control system based on fuzzy neural network PID control is proposed. Using the good dynamic control characteristic and self-learning ability of the fuzzy neural network to adjust the PID control proportion, integral and differential three adjustment parameters. The simulation and simulation of the system was carried out with the help of MATLAB simulink simulation software. The results show that the fuzzy neural network PID control system can shorten the stability time by about 45% and the overshoot by about 16%. Therefore, the fuzzy neural network PID control system is superior to the traditional PID control system.

Keywords: powder packaging; measurement system; fuzzy neural; PID control; MATLAB simulink

在包装计量过程中,计量精度一直是备受关注的关键因素,控制系统响应速度的快慢,超调量的大小,还有系统的稳定性直接影响着计量包装精度是否精确,因此对于控制系统的研究是目前提高包装计量精度的重要研究领域。就当前情况而言,中国的定量称重技术相较于国外还存在着一定的差距,虽然近 20 年中国定量称重包装设备的自动化程度有了很大的提升,但是由于中国研究起步晚,技术储备不足等因素导致设备开发相对较少,计量精度也不高^[1-2]。

目前粉体包装计量控制通常采用 PID 控制,PID 控制是一种采样控制,先通过对偏差值进行采样后再对控制量进行控制。PID 控制由于结构简单、使用方便等优点,在各种控制生产中被广泛应用^[3-5]。传统的 PID 控制是根据经验预先设定 3 个参数来实现闭环反馈控制^{[6]45},所以传统的 PID 控制只能用于线性的、静态的和控制精度要求不高的场合。而包装计量控制具有非线性、动态特性等^[7-8]特点,传统的 PID 控制就不能满足其动态计量包装的要求。

BP 算法是利用输出层得到误差估计出前一层(隐含层)的误差,再用此误差估计出更前层的误差,以此类推,可以获得隐含层中各层的误差,而且在由后向前的估算中也对权系数进行调整,使误差信号趋于最小^{[9]227}。模糊神经网络 PID 能实现 3 个参数的实时在线调整,克服控制系统中的非线性和不稳定性^{[9]227-228},从而优化定量计量系统。

为了改善现有包装计量控制系统的不足,实现包装计量控制系统的实时在线控制,解决传统 PID 控制中不能改善的非线性和生产中系统动态与静态之间的矛盾

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFD0400704);河南省科技厅自然科学基金项目(编号:182102110163)

作者简介:王艳,女,河南工业大学讲师,学士。

通信作者:王志山(1963—),男,河南工业大学教授,硕士生导师,博士。E-mail: xuxuemeng7439@163.com

收稿日期:2019-11-26

盾^{[6]1-2}的问题,试验拟设计基于模糊神经 PID 控制的粉体包装计量控制系统。

1 粉体计量包装控制的传统 PID 控制

研究的粉体计量规格为 25 kg/袋,允许误差为 $\pm 0.2\%$,主要装置如图 1 所示。粉体包装计量秤的工作原理是粉体物料进入加料仓即缓冲料仓后进行螺旋加料,当物料到达称重装置上的包装袋,称重装置会将称量值反馈给控制系统,控制根据传回的称量值来实时调节伺服电机的转速来改变加料速度,从而保证动态包装的精度^[10]。传统的 PID 控制是根据粉体包装计量过程中实际称量值与设定称量值之间的偏差,来整定控制器中的 P 、 I 和 D 3 个控制参数,从而调整螺杆喂料器的转速,传统的包装计量 PID 控制系统数学表达式为^[2]:

$$U(t) = P \left[e(t) + \frac{1}{I} \int_0^t e(t) dt + D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1)$$

式中:

$U(t)$ ——控制器的输出值;

S ——控制器的比例系数;

I ——积分时间, s;

D ——微分时间, s。

其拉普拉斯变换后函数形式为:

$$G(s) = K \left(1 + \frac{1}{IS} + DS \right), \quad (2)$$

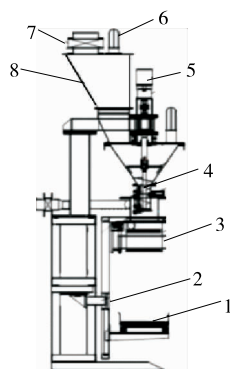
式中:

$G(s)$ ——传递函数;

K ——放大系数;

S ——时间常数, s。

理想状况下,系统会将实际的称量值与设定的称量值比较从而得出偏差,利用偏差的大小来控制螺杆喂料电机的转速,理论上是一个线性控制过程。但在实际动态包装计量中由于零点漂移、落料冲击等干扰的存在,其控制系统是典型的非线性的系统。传统的 PID 控制,参数需提前设置,当系统误差发生变化时,参数不能根据误



1. 托袋装置 2. 称重装置 3. 涨袋装置 4. 螺杆 5. 伺服电机
6. 呼吸帽 7. 蝶阀 8. 缓冲仓

图 1 粉体包装计量秤

Figure 1 Powder packaging weighing scale

差的变化进行实时调整,不能很好地解决计量系统动态和静态性能之间的矛盾^{[6]1-3}。因此采取模糊神经网络和 PID 控制结合的方法进行动态计量系统控制器的设计。

2 模糊神经网络 PID 控制系统

粉体包装计量控制系统不是一个线性的控制系统,且易受其他因素的影响。而模糊控制能较好地适应系统的非线性和时变性^[11]。神经网络对环境的变化具有很强的自学习能力,而模糊神经网络控制器将模糊理论表达知识的能力与神经网络的自学习能力相结合,能提高系统的整体控制能力^{[9]228},且控制系统能够得到优化。

目前, BP 神经网络的应用最为广泛,且是采用误差反向传播学习算法的多层前馈神经网络,多应用在系统辨识、自适应控制等领域^{[9]227}。试验采用 BP 神经网络控制器,控制系统框图如图 2 所示。

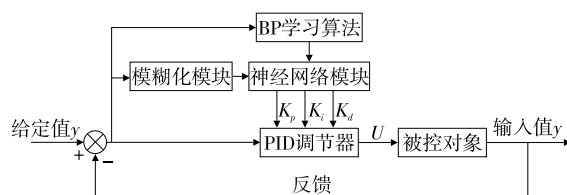


图 2 模糊神经网络 PID 控制框图

Figure 2 Fuzzy neural PID control block diagram

2.1 模糊化模块设计

将实际值对比给定值得到偏差。模糊化得到模糊语言集合 e 。由模糊规则对 e 和模糊控制规则 R 根据进行模糊决策,得出模糊控制量 U 。

试验设计的是一个 2 输入、3 输出的模糊神经网络 PID 控制器。输入为偏差与偏差变化率,利用模糊规则对 P 、 I 、 D 参数在线调整。以修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为输出,以应对 PID 参数在偏差和偏差变化率发生实时改变的情况下达到实时参数整定的需求,从而实现对包装计量的实时控制。

其中设定 $e, ec = [-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6]$ 。设其模糊子集为 $[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$ 。在选择隶属度函数时,由于三角形隶属度函数较为简单且运算方便,因此试验采用三角形隶属度函数,具体见图 3。

基于 PID 参数经验,总结计量系统中的实际变化规律,得出模糊 PID 控制器 K_p, K_i, K_d 3 个参数的控制规则表,见表 1。

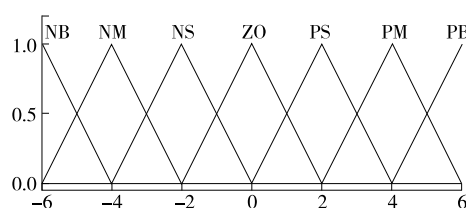


图 3 e, ec 隶属度函数图

Figure 3 e, ec Membership function graph

表 1 K_p, K_i, K_d 的模糊控制规则表
Table 1 K_p, K_i, K_d fuzzy control rules

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/PB/PS	PB/PB/NS	PM/PM/NB	PM/PM/NB	PS/PS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NM/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PM/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

2.2 粉体动态计量模糊神经网络 PID 控制器的设计

优良的动态包装系统包装精度误差值很小,与 BP 神经网络方法的训练目的是一致的。试验选取 BP 神经网络为学习算法。在 BP 神经网络中:第 1 层为两个输入即 e 和 ec 。第 2 层为 7 个神经元,分别对应输入的 7 个模糊子集 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB, 第 3 层隐含层的神经元为 49 个,对应模糊 PID 控制器的 49 条规则。第 4 层隐含层的神经元个数为 7,对应输出为相同个数的模糊子集。输出层分别是 K_p, K_i, K_d 。结构如图 4 所示。

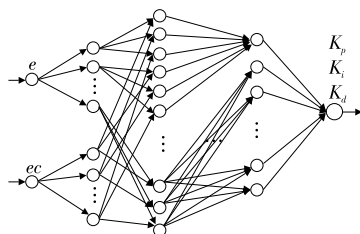


图 4 模糊神经网络系统结构图

Figure 4 Structure diagram of fuzzy neural network system

网络结构中:

网络输入层的输入为:

$$O_j^{(1)} = X(j), \quad (3)$$

式中:

$O_j^{(1)}$ ——网络输入层的输入;

$X(j)$ ——输入层函数($j=1, 2$, 表示两个输入 e 和 ec)。

网络隐含层的输入、输出为:

$$\begin{cases} net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^M w_{ij}^{(2)} o_j^{(1)} \\ o_i^{(2)}(k) = f[net_i^{(2)}(k)] \end{cases}, \quad (4)$$

式中:

w_{ij} ——隐含层加权系数;

(1)/(2) ——输入层/隐含层;

$o_j^{(1)}$ ——网络第 1 层输入;

$net_i^{(2)}(k)$ ——隐含层第 2 层输入;

$o_i^{(2)}(k)$ ——隐含层第 2 层输出;

f ——隐含层输出函数;

M ——输入节点数。

隐含层神经元的激活函数为:

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (5)$$

式中:

$f(x)$ ——激活函数;

x ——输入值。

网络输出层的输入、输出为:

$$\begin{cases} net_i^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^Q w_{ii}^{(3)} o_i^{(2)}(k) \\ o_i^{(3)}(k) = g[net_i^{(3)}(k)] \\ o_1^{(3)}(k) = K_p \\ o_2^{(3)}(k) = K_i \\ o_3^{(3)}(k) = K_d \end{cases}, \quad (6)$$

式中:

(3) ——输出层;

$net_i^{(3)}(k)$ ——输出层输入;

$w_{ii}^{(3)}$ ——输出层的权系数;

$o_i^{(2)}(k)$ ——输出层前一层的输出;

Q ——隐含层节点数;

$o_i^{(3)}(k)$ ——输出层输出;

l ——3 个输出;

g ——输出函数;

$o_1^{(3)}(k)/o_2^{(3)}(k)/o_3^{(3)}(k)$ ——输出层输出;

$K_p/K_i/K_d$ ——PID 的 3 个可调参数。

由于 K_p, K_i, K_d 不能为负值,故输出层取正的 Sigmoid 函数,即

$$g(x) = \frac{1}{2} [1 + \tanh(x)] = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}}, \quad (7)$$

式中:

x ——输入值。

性能指标函数为:

$$E(k) = \frac{1}{2} [rin(k) - yout(k)]^2, \quad (8)$$

式中:

$E(k)$ ——输出层性能指标函数;

$rin(k) - yout(k)$ ——计算时刻误差;

$rin(k)$ ——给定值;

$yout(k)$ ——实际输出值。

修正权系数运用梯度下降法,附加一个惯性项为:

$$\alpha \Delta w_{ii}^{(3)}(k+1) = \eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{ii}^{(3)}} + \Delta w_{ii}^{(3)}(k), \quad (9)$$

式中:

$\alpha \Delta w_{ii}^{(3)}(k+1)$ ——附加搜索快速收敛全局极小的惯性项;

$E(k)$ ——输出层性能指标函数;

$w_{ii}^{(3)}$ ——输出层的权系数;

η ——学习速率;

α ——惯性系数。

经 BP 网络对模糊规则表的训练,得出输入到输出之间的非线性关系,从而获得网络各层神经元的连接权值和阈值,并确定输入与输出间的非线性函数。利用这种映射关系可以得出动态称量系统在任意 e 、 e_c 的改变情况下 K_p 、 K_i 、 K_d 的修正值,实现实时在线控制。

3 模糊神经网络 PID 控制系统模拟仿真

参考文献[2]的近似数学模型:

$$G(s) = \frac{0.000\ 26}{0.06s^3 + 0.3s^2 + 0.73s}, \quad (10)$$

式中:

$G(s)$ ——传递函数;

0.000 26 ——放大系数;

0.06/0.3/0.73 ——时间常数, s。

在 MATLAB simulink 仿真时^[12-13],PID 的 3 个初始值由临界比例度法来确定,在设置模糊神经网络 PID 控制参数初始值时与传统的 PID 初始参数一致,仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可知,在两种 PID 控制系统中,模糊神经网络 PID 控制系统相对于传统 PID 系统稳定的时间提高了约 45%,超调量减少了约 16%。在开始时间段可以看出模糊神经网络 PID 控制系统也有一定的超调量。观察其传统的 PID 控制方法其超调量明显减小,而且系统达到稳

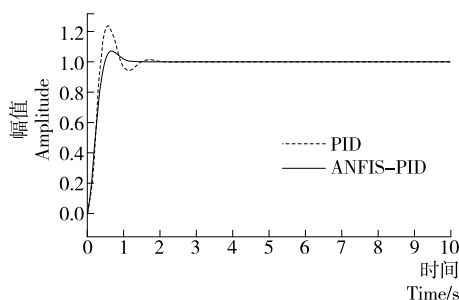


图 5 系统的阶跃响应曲线

Figure 5 Stepwise response curve of the system

定的时间相对较短。由此可知动态包装系统得到了优化,包装精度就会有所提升。同时,模糊神经网络 PID 控制器品质是否优良与初始参数、训练方法、模糊规则等因素有着至关重要的作用。试验中提到的模糊规则是借鉴前人的总结,运用的是 BP 神经网络,初始参数由临界比例度法得出。应该会有更适合的模糊规则、训练方法、模糊规则等因素使得系统能达到更优。

4 结语

针对粉体包装计量控制系统受螺杆的旋转惯性、零点漂移,下料冲击力等因素的影响而造成的系统的延迟、非线性等问题,在传统 PID 的基础上增加了模糊神经网络智能控制方法,基于 BP 神经网络,PID 的初始参数由临界比例度法得出,形成模糊神经网络 PID 控制器。由仿真系统的阶跃响应曲线图得知结果,与传统粉体动态包装计量控制系统相比,模糊神经网络 PID 控制系统稳定时间能缩短约 45%,超调量约减少 16%。这主要是因为模糊神经网络 PID 控制系统能实时调节 PID 的 3 个控制参数,从而使得控制系统得到优化。

参考文献

- [1] 缪刚,韩震宇,温显超,等. 电子定量包装秤系统设计[J]. 机械设计与制造, 2011(3): 25-27.
- [2] 彭博,钟飞. 基于模糊 PID 控制的粉末包装计量控制系统[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 11-16.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 1.
- [4] ASTROM K J, HAGGLUND T. The future of PID control[J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(11): 1 163-1 175.
- [5] 刘建东,张奕英,谷俊杰. 数字 PID 控制系统的鲁棒性分析与设计[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2003, 30(6): 30-33.
- [6] 马云飞. 基于 Matlab 的配料皮带秤模糊 PID 控制的仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [7] 吴宇平,章家岩,章磊,等. 定量称重包装系统 RBF 神经网络 PID 控制研究[J]. 安徽工业大学学报: 自科版, 2014, 31(3): 299-302.
- [8] 刘江. 李海龙动态定量称量包装系统 BP 神经网络 PID 控制算法[J]. 包装工程, 2017(5): 88-91.
- [9] 石新民,郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2018.
- [10] 张俊,李明. 基于 PLC 的模糊控制器在定量包装秤中的应用[J]. 制造业自动化, 2014(10): 110-112.
- [11] 赵健,马西庚,王艳丽,等. 基于模糊控制的皮带给料式定量包装秤优化控制研究[J]. 电气自动化, 2015, 37(1): 24-26.
- [12] 孙忠潇. Simulink 仿真及代码生成技术入门到精通[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 1-217.
- [13] 冯伟. 基于模糊神经网络网络的船用锅炉水位控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017: 45-54.