

基于模糊 PID 的螺旋加料机构粉体进料精度控制

付海明, 黄兴元*, 邱光军, 陈达

(南昌大学 先进制造学院江西省轻质高强结构材料重点实验室, 南京 330031)

摘要: **目的** 螺旋式加料机构存在传感器响应时间差, 造成系统延迟, 非线性等问题, 采用容积式来计量填充物料的质量的填充误差大。本文提出一种基于模糊 PID 控制的螺旋式加料机构计量控制系统。**方法** 利用模糊 PID 对螺杆式粉料加料装置进行控制, 通过模糊规则对 PID 控制比例、积分、微分参数实现参数自调整。基于 Matlab 中 Simulink 模块下模拟该模糊 PID 控制系统。**结果** 该控制系统稳定时间减少了 66%, 快速性提高了 21%, 超调量降低了 10%。**结论** 基于模糊 PID 控制系统的计量控制性能优于传统 PID 的。

关键词: 螺旋式加料机构; 计量控制系统; 模糊控制; PID 控制; MATLAB; Simulink

中图分类号: TP273⁺.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)23-0164-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.23.020

Powder Feeding Accuracy Control of Screw Feeding Mechanism Based on Fuzzy PID

FU Hai-ming, HUANG Xing-yuan*, QIU Guang-jun, CHEN Da

(Jiangxi Province Key Laboratory of Lightweight and High-strength Structural Materials,
School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

ABSTRACT: The screw feeding mechanism has problems such as poor sensor response time, system delay, nonlinearity, etc., and the use of volumetric methods to measure the weight of the filling material results in large filling errors. Therefore, the work aims to propose a measurement control system for a screw feeding mechanism based on fuzzy PID control. Fuzzy PID was used to control the screw powder feeding device, and fuzzy rules were adopted to control the proportion, integral, and differential parameters of PID to achieve parameter self-adjustment. The fuzzy PID control system was simulated based on the Simulink module in MATLAB. The stability time of the control system was reduced by 66%, the speed was improved by 21%, and the overshoot was reduced by 10%. The measurement control performance based on fuzzy PID control system is superior to traditional PID.

KEY WORDS: screw feeding mechanism; measurement control system; fuzzy control; PID control; MATLAB; Simulink

随着社会经济的发展, 粉料包装在食品、日化、化工等行业, 特别是近年来食品行业快速发展, 食品包装机械的需求越来越大。自动化程度不断变高, 对包装精度的要求也越来越高^[1-2]。现在中国的定量称重技术比国外还稍有落后^[3], 精确地动态称重计量是包装精度的最重要的部分, 对现在技术仍然是个难题^[4]。工业包装机械控制精度低, 包装机械给料装置大多采用螺旋给料装置, 单一采用螺旋填充属于

容积式来计量填充物料的重量, 容积式填充计量依赖于物料密度与填充率稳定, 使用开环控制计量精度不够^[5]。随着先进控制理论的发展, 一些学者对其进行了相关研究: 吴宇平等^[6]提出基于 RBF 神经网络 PID 的定量称重包装控制策略。利用具有任意非线性表达能力及较强自学习能力的 RBF 神经网络寻求最佳的 PID 参数, RBF 神经网络的 PID 控制性能明显优于传统 PID 的。陈静等^[7]基于 PI 控制上, 使用模糊控制

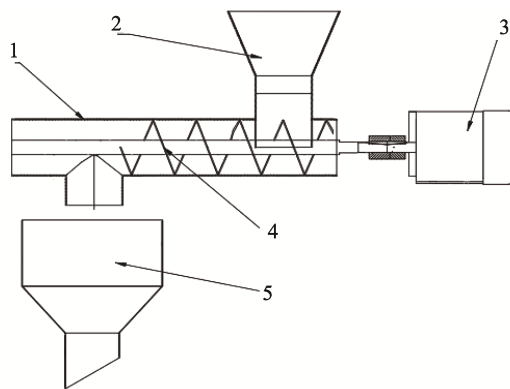
算法自调整 PI 参数, 控制系统稳定, 超调量小, 抗干扰能力强。

文中采用基于模糊 PID 对螺杆式粉料给料装置进行控制, 通过模糊规则对 PID 参数实现参数自调整。首先确定其驱动步进电机 86BYG250H 的传递函数, 利用 Matlab 中 Simulink 设计模糊 PID 控制器, 然后通过 MATLAB 进行仿真。

1 螺旋式加料装置

1.1 螺旋式加料装置的结构

螺旋式加料装置的结构如图 1 所示



1.槽体; 2.进料斗; 3.驱动电机;
4.螺旋叶片; 5.称量斗。

图 1 螺旋加料装置的结构

Fig.1 Structure of the screw feeding device

螺旋式加料装置由进料斗、槽体、螺旋叶片和步进电机构成。步进电机驱动螺旋叶片旋转, 开始下料, 采用快慢进料方式进料, 称量 10 kg 为一袋, 在质量相差较大时步进电机转速大; 在质量到达 9.75 kg 时开始模糊 PID 控制慢进料; 当物料到达 10 kg 时, 步进电机停止。等待下次信号再次加料。

1.2 输送量

输送量表示螺旋加料装置单位时间物料密度不变与填充率为 100% 下粉料输出质量的多少^[8], 计算见式 (1)。

$$Q = \frac{\pi[(D-2\tau)^2 - d^2]}{4} \times 60s\varphi n\beta \quad (1)$$

式中: Q 为螺旋加料装置的输送量; D 为螺旋输送机的叶片直径; τ 为螺旋叶片外径与螺槽内壁最小间隙; d 为螺旋轴的直径; s 为螺距; φ 为螺旋填充系数; n 为螺旋轴的转速; β 为螺旋输送机的倾斜系数。

由于物料密度与填充率不稳定, 容积式来计量填充物料的质量精度不够, 本文基于模糊 PID 对螺杆式粉料给料装置进行控制, 过程物料密度与填充率的变化不影响称量精度, 并可实现 PID 参数自调整, 结合

模糊控制进行控制器设计。

2 步进电机 86BYG250H 的传递函数

实现螺杆式加料机构粉体进料精度控制需要对其驱动步进电机建立模型。步进电机 86BYG250H 是两相混合式步进电机, 混合式步进电机具有高度非线性, 无法对其精确描述, 对混合式步进电机做以下简化和假定: 近似永磁体产生磁链随转子位置角按正弦规律变化, 并假设绕组电感与转子位置无关, 忽略两相绕组间互感^[9-11]。混合式步进电机 A, B 相的相电压平衡方程式为:

$$v_A = \frac{di_A}{dt}L + \frac{di_B}{dt}L_M + Ri_A - K_m\omega\sin(Z_r\theta) \quad (2)$$

$$v_B = \frac{di_B}{dt}L + \frac{di_A}{dt}L_M + Ri_B - K_m\omega\sin(Z_r\theta - \pi) \quad (3)$$

式中: L 为 A, B 的自感; L_M 为电机相绕组之间的互感; $\frac{di_A}{dt}$ 和 $\frac{di_B}{dt}$ 分别为 A、B 相电流的变化率; R 为 A、B 两相电阻; i_A 和 i_B 分别为电机两相电流; K_m 为电动机转矩常数; θ 为转子的机械角度; ω 为转子角速度; Z_r 为每一个转子级齿数。

转矩对应的平衡方程为:

$$T_e = \sum_{k=a}^b \frac{u_k \times i_k}{\omega} \quad (4)$$

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} - T_L \quad (5)$$

式中: T_e 为电机内部输出的转矩; J 为转动惯量; B 为制动阻尼系数; T_L 为负载转矩。

将式 (2) ~ (4) 代入式 (5) 可得:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} - T_L - K_m\omega\sin(Z_r\theta) - K_m\omega\sin(Z_r\theta - \pi) = 0 \quad (6)$$

式中: θ_1 为设定的旋转角; θ_2 为电机工作中旋转的角度, 则步进电机传递函数见式 (7)。

$$G(s) = \frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} \quad (7)$$

设步进电机单向励磁, $T_L = 0$ 由式 (5) 和式 (6) 可得出两相混合式步进电机对应的运动参数方程为:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} - \frac{Z_r L i_A^2}{2} \omega \sin(Z_r\theta) = 0 \quad (8)$$

当转子为平衡状态, $\frac{d\theta}{dt}$ 值为 0, 使用单相励磁,

绕组电流不变, 增量表达式为:

$$J \frac{d^2\delta\theta}{dt^2} + B \frac{d\delta\theta}{dt} - \frac{Z_r L i_A^2}{2} \omega \sin[Z_r(\delta\theta)] = 0 \quad (9)$$

增量 $\delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, 将式 (7) 线性化可得:

$$J \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} + B \frac{d\theta_2}{dt} - \frac{Z_r L i_A^2}{2} Z_r^2 (\theta_2 - \theta_1) = 0 \quad (10)$$

式(10)经过 Laplace Transform 得:

$$G(s) = \frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} = \frac{Z_r^2 L i_A^2}{2Js^2 + 2Bs + Z_r^2 L i_A^2} \quad (11)$$

查阅资料得步进电机 86BYG250H 电机齿数为 50、转动惯量为 $4.57 \text{ J}(\text{kg} \cdot \text{cm}^2)$ 、阻尼黏滞系数为 0.07、感抗为 7.8 L/Mh 、相电流为 6 A、步距角为 1.8° 。可得步进电机响应函数:

$$G(s) = \frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} = \frac{76.8}{s^2 + 0.015s + 76.8} \quad (12)$$

3 模糊 PID 控制系统

3.1 模糊 PID 控制器的设计

螺旋加料机构是非线性系统,并且是滞后的。粉末的流量与螺杆的转速之间并非线性关系,也存在着许多扰动^[12],利用模糊控制的较强推理能力进行实时改变 K_p 、 K_i 、 K_d 。称量斗上有压力传感器,压力传感器配合螺旋加料机构,由压力传感器传出信号根据实际质量与目标质量的差值,对螺旋进给转速实时控制,以达到较快响应和较高稳定性。研究采用模糊控制算法与 PID 控制结合的方法对螺旋加料机构进行控制。模糊 PID 系统框图^[13]如图 2 所示。

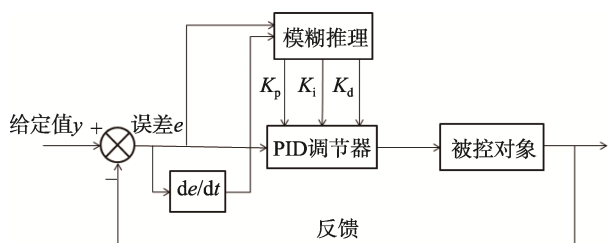


图 2 模糊 PID 控制框图
Fig.2 Fuzzy PID control block diagram

根据 PID 参数调整经验,确定模糊控制器的模糊控制规则表。先经过模糊化、模糊控制规则进行模糊推理和去模糊化,得到 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 参数。对参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行实时调整,模糊 PID 参数初始值为 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 。与 PID 控制中 K_p 、 K_i 、 K_d 一样,通过试凑法将 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 对应的初始值分别取 2.5、15、0.99。 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 是模糊 PID 控制器对应参数调整量^[14-15],得出整定后的模糊 PID 参数为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases}$$

3.2 输入输出变量的确定

选取粉料与目标值的质量偏差 e 和偏差变化率

e_c 作为模糊控制器的输入变量。当质量偏差 $|e| < 250 \text{ g}$ 时采用模糊 PID 控制。偏差 e 基本论域采用 $(-250, 250)$,划分为 7 个等级, $E = \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$,则偏差 e 的量化因子 $K_e = 6/250 = 0.024$; 偏差变化率 e_c 基本论域采用 $(-50, 50)$,划分为 7 个等级, $E_c = \{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$,则偏差率 e_c 的量化因子 $K_{ec} = 6/50 = 0.12$ 。 K_p 、 K_i 、 K_d 的论域分别为 $(-0.3, 0, 3)$ 、 $(-0, 0.6, 0, 0.6)$ 、 $(-3, 3)$ 。模糊子集定义为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$,其元素分别表示负大,负中,负小,零,正小,正中,正大。

3.3 隶属度函数的选择

考虑论域的覆盖程度及灵敏度、稳定性和鲁棒性等原则,同时为了协调参数调整,各模糊子集以三角形及 S 型函数为隶属度函数曲线。系统的隶属度函数选择三角形函数^[16],隶属度函数如图 3~7 所示。

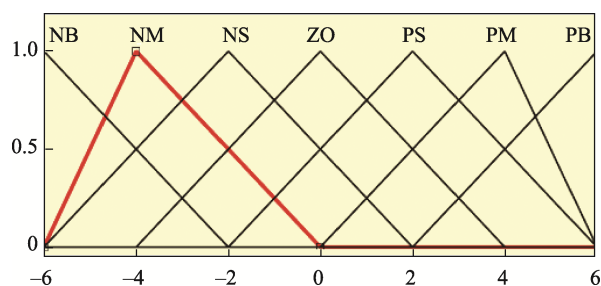


图 3 偏差 E 隶属度函数
Fig.3 Deviance E membership degree function

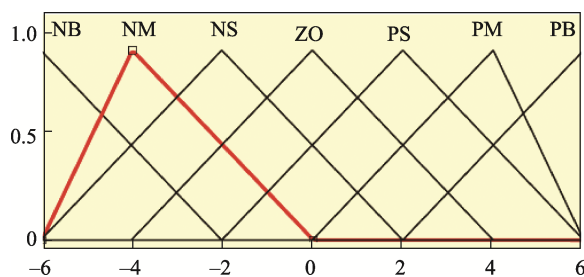


图 4 偏差变化率 E_c 隶属度函数
Fig.4 Rate of change of deviation E_c membership degree function

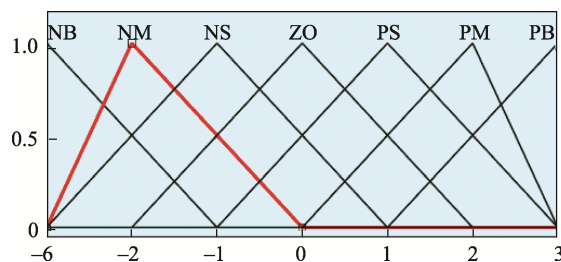


图 5 K_p 隶属度函数
Fig.5 K_p membership function

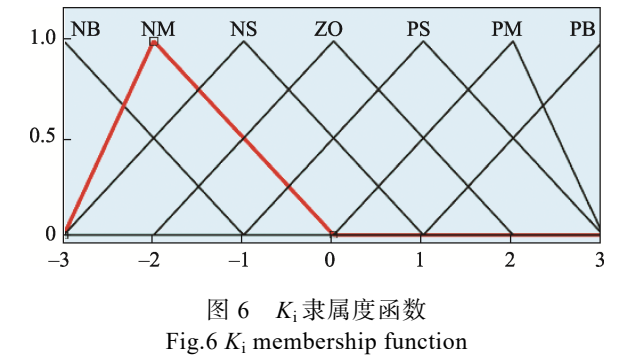


图 6 K_i 隶属度函数
Fig.6 K_i membership function

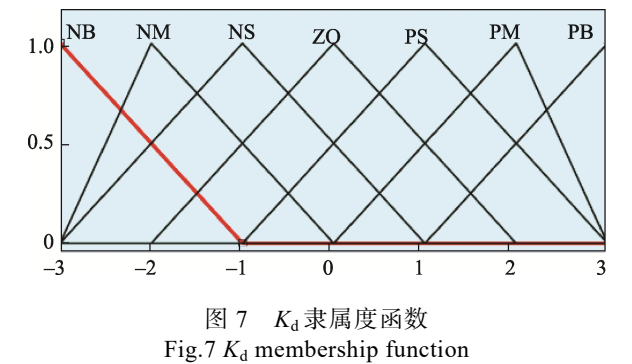


图 7 K_d 隶属度函数
Fig.7 K_d membership function

3.4 模糊控制规则的确定

模糊控制规则库设计就是利用工人熟练操作的经验和语言表达专家的知识,按照人的思维方式制定模糊控制规则的过程。去模糊化的方法有多种,本文控制系统选用重心法去模糊化,对输入空间论域的所有组合计算出相应的输出控制量,从而得到所需的模糊控制器的控制表^[17]。根据操作经验和实验分析获得推理规则如表 2~4 所示。

表 1 ΔK_p 模糊规则控制
Tab.1 ΔK_p fuzzy rule control

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PN	PM	ZO	ZO	NS	NS
ZO	PM	PS	-PS	NS	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	NB

系统根据控制规则进行模糊控制。使用 MATLAB 中的 Ruler Editor 模块编写模糊规则,使用 Mamdani 进行模糊推理,得出模糊控制的模糊控制规则,如图 8~10 所示。

表 2 ΔK_i 模糊规则控制
Tab.2 ΔK_i fuzzy rule control

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	PB	PB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	PM	PM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	PM	PS	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	PS	PS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	NS	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_d 模糊规则控制
Tab.3 ΔK_d fuzzy rule control

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	NS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	NB	NM	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	NB	NM	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	NM	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PS	ZO	PM	PM	PS	PS	PB

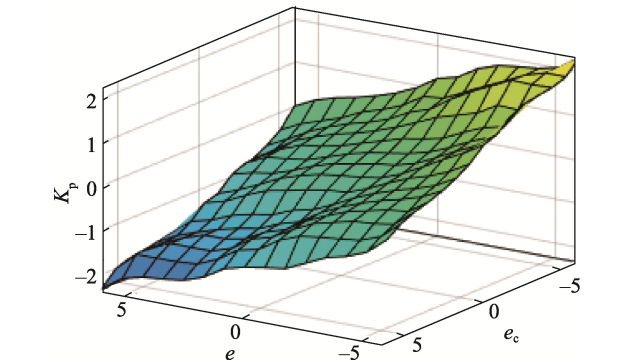


图 8 K_p 模糊推理的三维空间图
Fig.8 K_p three-dimensional spatial graph of fuzzy reasoning

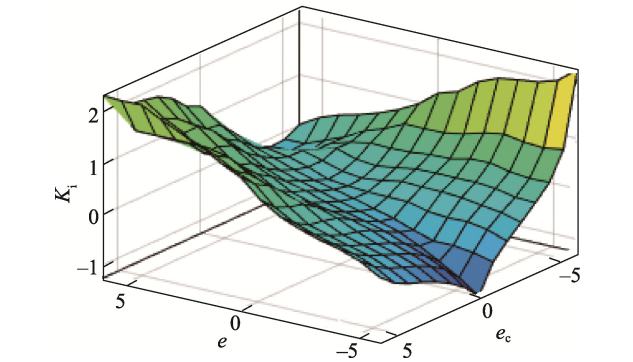


图 9 K_i 模糊推理的三维空间图
Fig.9 K_i three-dimensional spatial graph of fuzzy reasoning

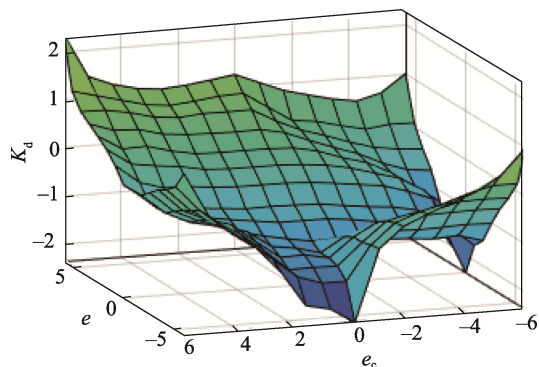


图 10 K_d 模糊推理的三维空间图
Fig.9 K_d three-dimensional spatial graph of fuzzy reasoning

将 K_p 、 K_i 、 K_d 模糊推理的三维空间整理成 K_p 、 K_i 、 K_d 修正参数的表格。如表 5 ~ 7 所示。

表 4 K_p 修正参数
Tab.4 K_p correction parameters

E_c	E						
	6	4	2	0	2	4	6
-6	2.35	1.91	1.77	1.25	0.69	0.4	0
-4	1.91	1.91	1.35	0.69	0.26	-0.1	-0.69
-2	1.77	0.909	0.446	0.26	-0.1	-0.26	-1.25
0	1.25	0.69	0.1	0.06	-0.26	-0.8	-1.67
2	0.69	0.26	-0.1	-0.69	-1.09	-1.35	-1.77
4	0.4	0	-0.26	-0.8	-1.35	-1.35	-1.91
6	0	-0.6	-1.09	-1.25	-1.77	-1.91	-2.35

表 5 K_i 修正参数
Tab.5 K_i correction parameters

E_c	E						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
-6	2.35	1.91	1.77	1.25	0.69	0.4	0
-4	0.284	0.347	0.333	0.26	0.26	0	-0.167
-2	-0.348	-0.111	-0.03	0.06	0	0.26	0.26
0	-1.25	-0.69	-0.26	0	0.26	0.69	1.25
2	-0.69	-0.26	-0.1	0.26	0.69	1.35	1.77
4	-0.4	0	0.26	0.909	1.35	1.35	1.91
6	0	0.4	0.69	1.35	1.91	2.35	2.35

表 6 K_d 修正参数
Tab.6 K_d correction parameters

E_c	E						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
-6	1	-0.371	-1.44	-2.35	-1.91	-0.444	1
-4	0.104	-0.371	-1.44	-0.909	-0.446	-0.266	0.5
-2	-0.365	-0.47	-1.35	-0.8	-0.1	0.154	0.8
0	-2.35	-1.35	-1.35	-0.69	0	0.69	1.25
2	-1.91	-1.35	-1.09	-0.69	0	0.69	1.09
4	-0.444	-0.371	-0.69	-0.6	0.128	0.8	1.2
6	1	0.4	0	0	0.577	0.93	2.35

4 仿真分析

在 Matlab 中进行仿真分析^[18]，模糊 PID 与 PID 控制结果显示，模糊 PID 控制在稳定时间、超调量和上升时间都展现出更好的性能。PID 控制器与模糊 PID 控制器 Simulink 仿真框图如图 11 所示。

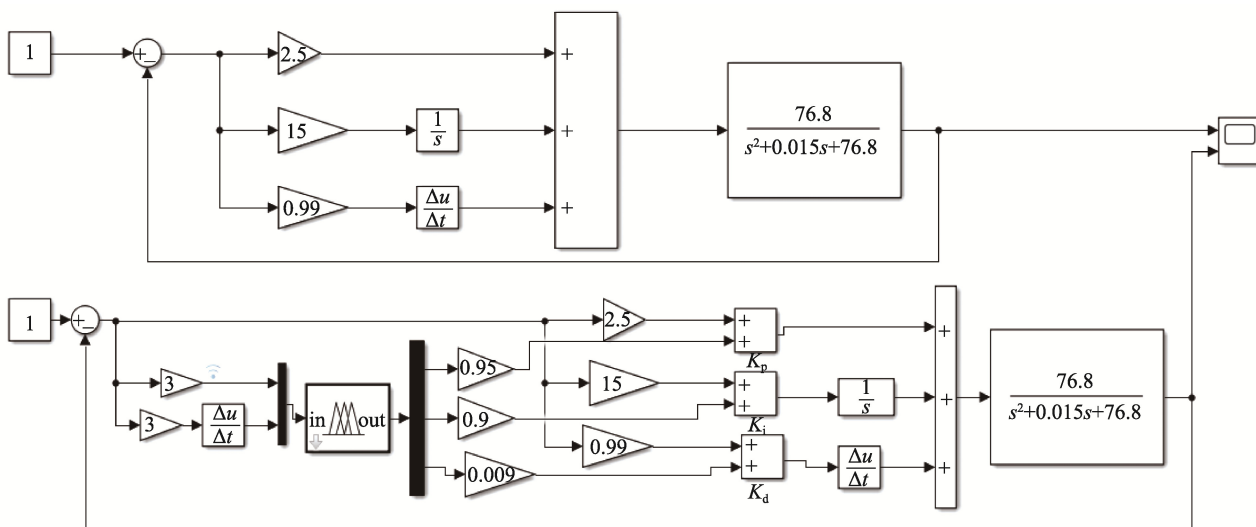


图 11 PID 控制器与模糊 PID 控制器 Simulink 仿真框图
Fig.11 Simulink simulation block diagram of PID controller and fuzzy PID controller

由图12可知,在同样的PID初始参数下,传统PID稳定时间为5 s,上升时间为0.7 s,超调量约为28%;模糊PID稳定时间为1.7 s,上升时间为0.55 s,超调量约为25%。稳定时间减少了66%,快速性提高了21%,超调量减少了10%,仿真效果如图12所示。

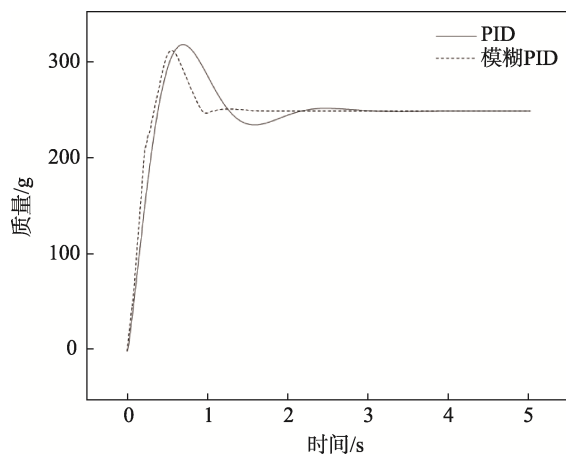


图12 仿真效果对比

Tab.12 Comparison of simulation results

5 结语

在针对螺旋加料机构控制系统中,避免系统滞后性的影响,在传统PID控制的基础上增加了模糊控制。与PID控制器比较,该模糊PID控制器具有比PID控制器有更好、更快的稳定性,更高的快速性和更低的超调量。仿真结果显示,与传统PID控制系统对比,模糊PID控制快速性提高了21%,稳定时间减少了66%,超调量减少了10%。

模糊控制算法能实时调节PID的控制参数,PID参数得到实时优化,使螺旋加料机构能快速、准确并稳定的工作,从而提高螺旋加料机构给料的效率和精度。

参考文献:

- [1] 戴宏民,戴佩燕,周均. 中国包装机械发展的成就及问题[J]. 包装学报,2012,4(1): 61-65.
DAI Hong-min, DAI Pei-yan, ZHOU Jun. Achievements and Problems in China's Packaging Machinery Developments[J]. Packaging Journal, 2012, 4(1): 61-65.
- [2] 张西良,路欣,毛翠云. 粉粒状物料混合式定量充填技术研究[J]. 计量学报,2003,24(4): 310-313.
ZHANG Xi-liang, LU Xin, MAO Cui-yun. Study on the Techniques of Composite Type Quantifying-Filling for Powder and Particle Materials[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(4): 310-313.
- [3] 王艳,陈静,王志山,等. 基于模糊神经网络PID控制的粉体包装计量控制系统[J]. 食品与机械,2020,36(1): 136-139.
WANG Yan, CHEN Jing, WANG Zhi-shan, et al. Powder Packaging Measurement Control System Based on Fuzzy Neural Network PID Control[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 136-139.
- [4] 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,2017,38(5): 78-81.
LIU Jiang, LI Hai-long. PID Control Algorithm of BP Neural Network of Dynamic Quantitative Weighing Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 78-81.
- [5] 宋欢. 定量螺旋输送机的优化设计及模拟[D]. 青岛: 青岛科技大学,2016.
SONG Huan. Optimization Design and Simulation of Quantitative Screwconveyor[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016.
- [6] 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(自然科学版),2014,31(3): 299-302.
WU Yu-ping, ZHANG Jia-yan, ZHANG Lei, et al. A Study of Quantitative Weighing Packaging System Based on RBF Neural Network PID Control[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2014, 31(3): 299-302.
- [7] 陈静,王志山,徐雪萌,等. 基于模糊控制的失重秤粉体包装精度研究[J]. 包装工程,2019,40(17): 153-158.
CHEN Jing, WANG Zhi-shan, XU Xue-meng, et al. Research on Powder Packaging Accuracy of Weightless Scale Based on Fuzzy Control[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(17): 153-158.
- [8] 邹剑平,苏焕欧,曾庆丰. 定量螺旋输送机分析与改进[J]. 机电信息,2013(12): 99-100.
ZOU Jian-ping, SU Hua-nou, ZENG Qing-feng. Analysis and Improvement of Quantitative Screw Conveyor[J]. Mechanical and Electrical Information, 2013(12): 99-100.
- [9] 徐文强,闫剑虹. 二相混合式步进电动机传递函数模型推导[J]. 空间电子技术,2011,8(3): 50-53.
XU Wen-qiang, YAN Jian-hong. Derivation of Transmission Function Model of Two-Phase Hybrid Stepping Motor[J]. Space Electronic Technology, 2011, 8(3): 50-53.
- [10] 周碧书. 步进电动机的传递函数研究法[J]. 微电机,

- 1989, 22(1): 9-14.
- ZHOU Bi-shu. Utilize the Transfer Function for Studying on Stepping Motor[J]. Micromotors, 1989, 22(1): 9-14.
- [11] 李浩, 黄潇嵘, 孙海林, 等. 一种新型太阳阵驱动机构用两相步进电机驱动技术研究[J]. 科学技术创新, 2021(7): 190-192.
- LI Hao, HUANG Xiao-rong, SUN Hai-lin, et al. Research on Driving Technology of Two-Phase Stepping Motor for a New Type of Solar Array Driving Mechanism[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2021(7): 190-192.
- [12] 杨晓, 董娜, 王国柱. 基于模糊短反馈 PID 控制的粉末包装计量控制系统[J]. 包装工程, 2019, 40(9): 148-153.
- YANG Xiao, Dong Na, WANG Guo-zhu. Powder Packaging Metering Control System Based on Fuzzy Short Feedback PID Control[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(9): 148-153.
- [13] 王圣斌. 自动化食品包装机械的控制系统优化设计[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 297-300.
- WANG Sheng-bin. Optimal Design of Control System for Automatic Food Packaging Machinery[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(11): 297-300.
- [14] 许高齐, 陈玉, 王鹏. 混合式步进电机模糊 PID 控制器设计仿真[J]. 安徽工程大学学报, 2019, 34(6): 39-45.
- XU Gao-qi, CHEN Yu, WANG Peng. Design Simulation of Hybrid Stepping Motor Fuzzy PID Controller[J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2019, 34(6): 39-45.
- [15] 温玉春, 刘祺君. 基于模糊 PID 的包装机热封切刀温度控制[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 109-113.
- WEN Yu-chun, LIU Qi-jun. Temperature Control of Heat-Sealing Cutter of Packaging Machines Based on Fuzzy PID[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 109-113.
- [16] 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.
- ZHAO Jian, MA Xi-geng, WANG Yan-li, et al. A Research on Optimization of Feeding Belt Quantitative Packaging Scale Based on Fuzzy Control[J]. Electrical Automation, 2015, 37(1): 24-26.
- [17] 张昱生. 自动定量充填机控制系统研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- ZHANG Yu-sheng. Research on Control System of Automatic Quantitative Filling Machine[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [18] 宋超, 曹翱, 温家玺. 自适应模糊 PID 控制器的设计及 MATLAB 仿真[J]. 现代制造技术与装备, 2018(7): 203-205.
- SONG Chao, CAO Ao, WEN Jia-xi. Design of Adaptive Fuzzy PID Controller and MATLAB Simulation[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(7): 203-205.

责任编辑: 曾钰婵