

基于模糊短反馈 PID 控制的粉末包装计量控制系统

杨晓, 董娜, 王国柱
(河南工学院, 新乡 453003)

摘要: **目的** 粉末包装计量控制系统具有非线性等特点, 传统的 PID 控制越来越无法满足工业产品包装的性能要求, 为了提高包装机计量控制系统的速度、精度以及稳定性等, 以实现快速精准的产品包装。**方法** 在现有控制理论的基础上, 结合模糊控制理论和生物神经内分泌腺体激素调节的原理, 提出一种基于模糊短反馈 PID 控制的粉末包装计量控制系统。模糊控制的引入可以实现对传统 PID 控制器参数的在线调整; 短反馈算法的引入可以使模糊 PID 控制更加精确、快速, 并将该新型控制算法应用到粉末包装定量控制系统中与传统控制算法进行对比。**结果** 通过 Matlab 中的 Simulink 工具箱搭建模糊短反馈 PID 控制的粉末包装计量控制系统仿真平台, 并与传统的 PID 控制和模糊 PID 控制进行了比较可知, 该系统具有响应速度快、抗干扰能力强等优良的性能。**结论** 通过仿真验证可知, 模糊短反馈 PID 控制的粉末包装计量控制系统具有稳定性好、响应快等良好的性能指标, 同时具备一定的抗干扰能力。

关键词: 粉末包装; 计量; 传统 PID 控制; 模糊控制; 生物神经内分泌; 短反馈算法; Matlab

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)09-0148-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.024

Powder Packaging Metering Control System Based on Fuzzy Short Feedback PID Control

YANG Xiao, DONG Na, WANG Guo-zhu

(Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the speed, accuracy and stability of measurement control system of packaging machine so as to achieve the fast and accurate product packaging because the measurement control system of powder packaging has the non-linearity and traditional PID control can not meet the performance requirements of industrial product packaging. On the basis of the existing control theory, combining the theory of fuzzy control and the principle of hormone regulation of biological neuroendocrine glands, a powder packaging metering control system based on Fuzzy short feedback PID control was proposed. The introduction of fuzzy control could realize on-line adjustment of parameters of traditional PID controller. The introduction of short feedback algorithm could make the fuzzy PID control more accurate and fast. The new control algorithm was applied to the quantitative control system of powder packaging to be compared with the traditional control. Simulink toolbox in Matlab was used to build a simulation platform of powder packaging metering control system based on Fuzzy short feedback PID control. Compared with traditional PID control and fuzzy PID control, the system had fast response speed and strong anti-interference ability. The simulation results show that the powder packaging metering control system based on Fuzzy short feedback PID control has good stability, fast response and other good performance indicators, and has a certain anti-interference ability.

收稿日期: 2018-12-17

基金项目: 河南省科技攻关项目 (182102210033)

作者简介: 杨晓 (1983—), 女, 硕士, 河南工学院讲师, 主要研究方向为控制理论与科学、嵌入式控制系统应用。

KEY WORDS: powder packaging; metrology; traditional PID control; fuzzy control; biological neuroendocrine; short feedback algorithm; Matlab

商品的定量包装尤其粉末包装涉及各行各业（如：食品、医药、化工等），各大企业为了大规模包装产品，引进了粉末物料包装机械。对于整个包装过程物料的计量控制系统将扮演着重要的角色，其控制的好坏也直接决定了产品包装的质量以及产量^[1]。在粉末包装计量控制系统中由于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，这些都将影响着包装产品的质量和精度等，也造成了材料的浪费。随着计量精度的不断提高，传统 PID 控制将很难达到令人满意的结果，同时传统的 PID 控制器参数一经确定将无法根据系统的实际情况进行在线调整^[2]。根据智能控制理论的发展，也为实现粉末物料包装的速度和定量的精度提供了新的途径。张昱生等^[3]将模糊 PID 控制应用在粉末计量控制系统中，通过仿真与传统 PID 控制相比提高了包装的性能；董婷^[4]将神经网络应用在称重包装系统中，仿真实验结果表明，系统超调量减小，上升时间快；谭思云、尤伟军等^[5]应用了新型控制理论——九点控制器理论，并将该控制器成功应用到超细粉末自动包装机中，通过仿真可知，其很好地改善超细粉末自动包装机在包装过程中存在的精度低、速度慢等问题。通过对以上控制器的研究可知，每种算法都存在着优缺点^[6]。传统 PID 控制结构简单，参数无法调整；模糊控制推理能力强，实现参数的自调整，但存在盲区，精度一般等。结合以上，文中设计模糊短反馈 PID 控制器，克服模糊控制精度不高的缺点，短反馈算法是依据生物神经内分泌腺体激素调节的原理的基础上而是提出来的，大大改善控制系统的精度问题，进而提高产品包装的精度。

1 粉末包装计量控制系统

1.1 定量包装机结构

针对各种各样的粉末物料精密计量设备，文中采用的是螺杆计量设备，其中螺杆秤是最主要的应用，其结构见图 1^[7]。由图 1 可知，粉末包装计量控制系统中定量包装机主要由伺服电机、缓冲料仓、减速电机、螺杆、搅拌棒、涨袋装置、称量传感器以及托袋架等结构组成。其中，伺服电机提供动力，用来控制螺杆的旋转情况（转速和圈数）；螺杆是粉末式螺杆定量充填包装机的核心构件，它是由心轴和缠绕在其上的螺旋叶片组成；缓冲料仓主要用来防止物料直接堵住下料装置；称量传感器将信号传给信号处理单元，与目标设定值进行比较形成偏差等。其中，整个

定量包装机结构中，称量控制系统是整个粉末包装计量控制系统的核心^[8]。

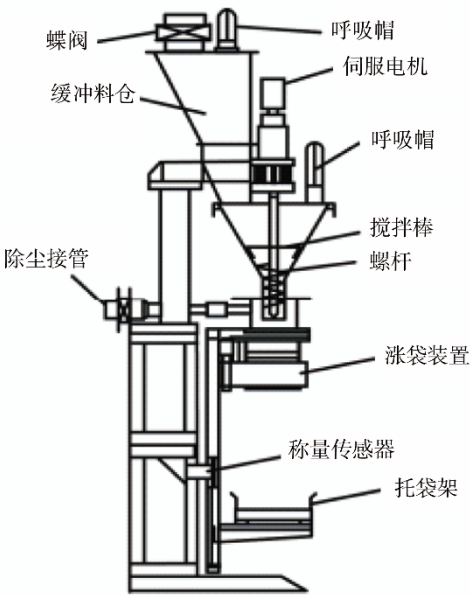


图 1 包装机的构成
Fig.1 Composition of packaging machine

1.2 工作过程

文中研究的计量控制系统系统是一个闭环控制系统，由伺服电机提供运转的动力，该系统流程见图 2^[9]。该系统根据企业厂家事先设定好粉末物料的质量，即目标值；称量传感器实时地将粉末物料的质量变化情况输送到计算机控制系统，计算机在获得当前

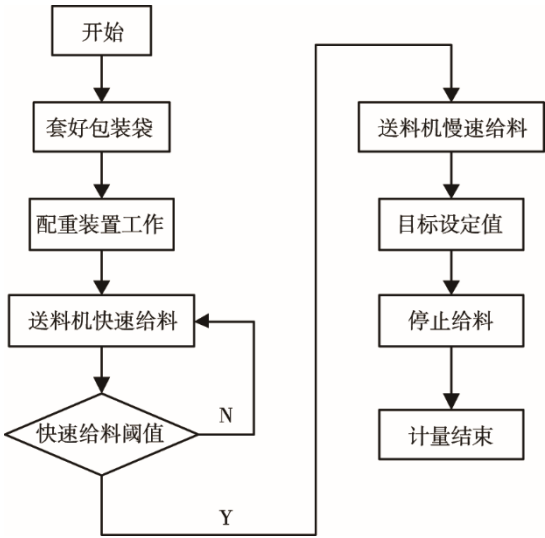


图 2 定量装置流程
Fig.2 Flow chart of quantitative device

粉末物料的实际值时将与预先设定好的目标值进行比较,并将该信号传到伺服电机,电机接收到该信号后通过精准控制定量包装机的旋转螺杆来进行快速给料操作,控制粉末物料的下料,即控制螺杆的转速和圈数。通过计算机设置快速给料阈值,当到达设定的快加料质量时,则送料机将减慢速度,缓慢下料,进而使物料包装的质量达到设定的目标值上,完成粉末物料的精准包装。

1.3 粉末包装计量要求

针对粉体物料计量过程的要求很多,一般可以分为以下几点:计量准确;计量连续、稳定;调节范围宽、量程大;密闭,无扬尘。针对以上这几点要求,设计出以下的粉末包装计量控制系。

2 模糊短反馈 PID 控制器的设计

2.1 传统 PID 控制算法

传统的 PID 控制器是依靠目标与实际行为之间的误差来决定消除此误差的控制策略,且不依赖被控对象的输入与输出特性。在实际应用中,通过选定合适的参数可以获得良好的静态指标,因而被广泛应用于各行各业。在粉末包装计量控制系统中,依据实际物料质量与目标值之间的差值,来调整传统 PID 控制器的参数,即比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 。其控制原理见图 3^[10]。

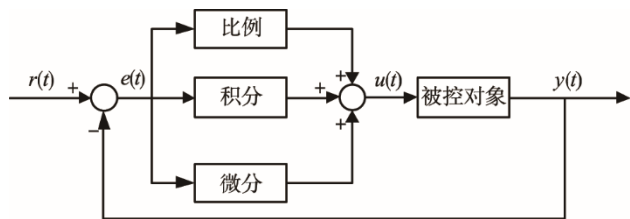


图 3 PID 控制原理

Fig.3 Control principle of PID

由图 3 可知, $y(t)$ 为系统的输出; $r(t)$ 为包装计量控制系统的给定值; 误差 $e(t)$ 为 PID 控制系统的输入量, 因此 PID 控制系统的输入输出之间可以描述为:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

可以将式 (2) 写成传递函数的数学形式:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right) \quad (3)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。

2.2 模糊 PID 控制算法

模糊控制属于一种新的智能控制, 是一种非线性

控制。1965 年 L.A.Zadeh 教授首先在论文中提出了隶属度函数的概念用于表达事物的模糊性概念, 主要由模糊集合、模糊逻辑、模糊推理和模糊控制等几部分组成。与传统控制方法如 PID 控制相比, 模糊控制用语言式的模糊变量来描述系统而不是用数值来描述系统, 因此不需要被控对象的精确数学模型, 其也没有具体的表达式, 这也是模糊控制最大的优点^[11], 为控制系统的设计和应用带来便利。

结合传统 PID 控制的优点, 模糊 PID 控制算法能够有效地克服各自算法的优点。运用模糊理论, 把规则的条件、操作用模糊集合表示, 通过模糊规则能够实现传统 PID 控制器参数的在线调整。其原理见图 4。由图 4 可知, 模糊自适应 PID 控制是一个 2 输入 1 输出的控制系统, 其中 2 个输入分别是系统的误差 (包装的实际质量与设定质量之间的差值) 和误差的变化量; 1 输出为包装计量控制系统输出的实际包装质量。模糊自适应 PID 控制克服了传统 PID 控制参数不能调整的弊端, 通过实际控制系统的输出情况, 不断与设定值进行比较, 在利用模糊控制的知识库和模糊推理, 不断改变传统 PID 控制器的参数, 以适应当前系统的情况, 不断调整, 以满足控制的各个时刻最终使误差减小到 0, 即系统输出与设定值一样, 达到工艺的生产要求。

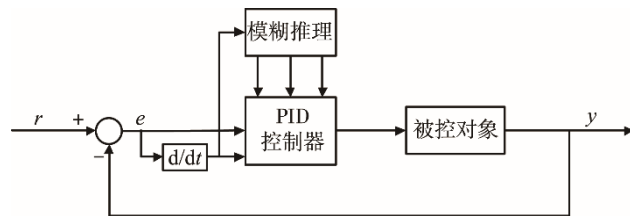


图 4 Fuzzy-PID 控制原理

Fig.4 Control principle of Fuzzy-PID

2.3 短反馈算法

短反馈是相对于常规的反馈 (所谓长反馈) 而言, 其反馈不在从被控对象的输出反馈到与设定值进行比较, 而是直接从控制器的输出反馈到控制器本身, 对控制器的输出进行调节, 在长短反馈的双层共同作用下能够又快又准地将被控对象的输出达到设定值上。这种思想来自于人体的内分泌调节过程, 各种腺体分泌的响应激素不仅作用于下个腺体, 同时本身的分泌量也影响着自身的分泌, 这就是短反馈的思想。

为了更加具体地说明短反馈的工作原理, 引入人体内分泌腺体激素调节的过程来说明, 见图 5^[12]。其中下丘脑分泌的激素用 H1 表示, 垂体分泌的激素用 H2 表示, 肾上腺分泌的激素用 H3 表示。其中短反馈是激素 H2 的浓度在正反馈作用于肾上腺的同时又通过负反馈作用垂体本身来控制激素 H2 的浓度, 进而影响肾上腺的分泌。

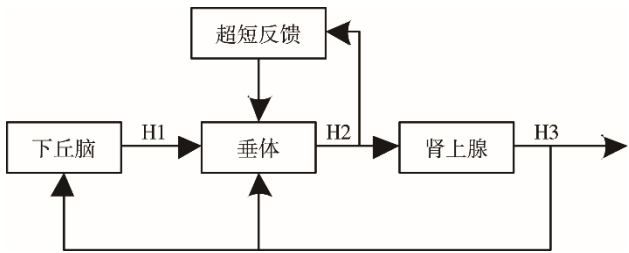


图 5 内分泌调节回路
Fig.5 Endocrine regulatory circuit

3 模糊短反馈 PID 控制器的粉末包装计量控制系统

由于传统 PID 控制本身的不足,在粉末包装计量控制系中也存在不足,结合模糊控制和短反馈算法,提出了模糊短反馈 PID 控制的粉末包装计量控制系统。该系统能够克服传统 PID 控制精度不高、抗干扰能力差以及抖动等缺点。为了进一步提高粉末包装计

量时的精度,提高产品质量,在模糊 PID 控制的基础上引入了短反馈算法,不仅提高了控制的速度,还提高了控制器的精度,其结构见图 6。

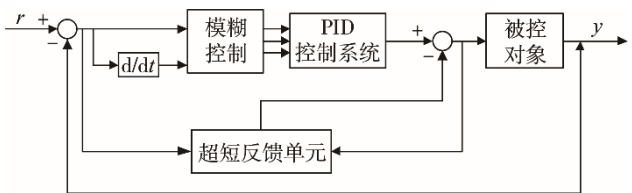


图 6 模糊短反馈 PID 控制的结构
Fig.6 Fuzzy short feedback PID control structure

模糊自整定 PID 控制器对其参数自整定修改是基于 PID 控制策略,根据模糊规则表对参数进行在线修改。通常,模糊控制的规则大都是由专家经验总结而来,同时又因其与被控对象的具体模型无关,将其应用在粉末包装定量控制系统中。针对 K_p , K_i , K_d 等 3 个参数分别整定的模糊控制见表 1^[13]。

表 1 K_p , K_i , K_d 模糊规则
Tab.1 K_p , K_i , K_d fuzzy rule

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/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/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PS/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NSPS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/ZM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

根据控制器中的规则,选用三角形的隶属度函数,在 Matlab 的 Fuzzy Logic 工具箱中搭建控制器,在规则窗口中输入上述表 1 中的模糊控制规则。其中对输入变量进行模糊,用 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} 表示。参考文献[15]给出的变量范围,依据实际定量情况,设定 e 的实际论域: e 在[60 g, 60 g]中, e_c 的实际论域变化范围为[-6, 6]。论域范围为{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6},输出变量 K_p , K_i , K_d 论域为{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3}。

对于短反馈算法,文中根据 Farhy.L.S 教授提出的规律进行分析,其非线性函数见式 (4—5)^[14]。

$$f(\Delta u_c(k)) = a \cdot b \cdot \left(\frac{(|\Delta u_c(k)|)^n}{1 + (\Delta u_c(k))^n} \right) \quad (4)$$

$$b = \begin{cases} +1 & e \geq 0 \\ -1 & e < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: a 为 n 因子系数; n 为因子系数。

结合以上原理和公式,可以总结出输出 u 为:

$$u(k) = u_c(k) + f(\Delta u_c(k)) \quad (6)$$

4 仿真结果与实验分析

4.1 仿真结果

参考文献[15]给出了粉末包装计量控制系统模型的传递函数:

$$G(s) = \frac{0.000\ 26}{0.06s^3 + 0.3s^2 + 0.73s} \quad (7)$$

通过以上分析,为了比较模糊短反馈 PID 算法的可行性和优越性,对粉末包装计量控制系统进行单位阶跃和斜坡函数的实际仿真,并与模糊 PID 和传统的 PID 控制进行比较,仿真曲线见图 7 和图 8。从图 7 和图 8 中都可以看出,文中算法(模糊短反馈 PID 控制)的可行性、优越性与其他 2 种算法比较,具有更加优良的动静态性能指标。其中,文中方法的超调量为 0、稳态误差为 0、上升时间为 1.85 s、调节时间为 2.11 s,其性能都要比传统 PID 控制和模糊 PID 控制要好。

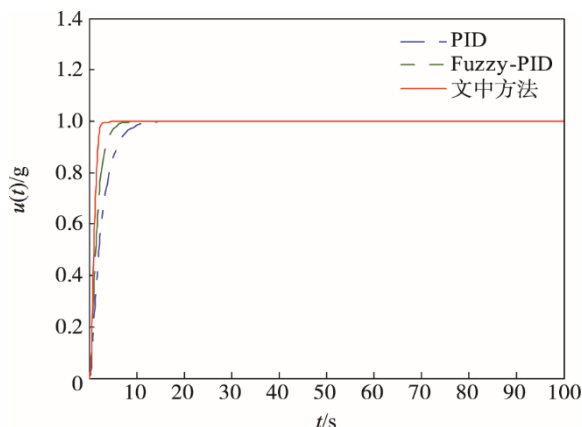


图 7 单位阶跃仿真曲线
Fig.7 Unit step simulation curve

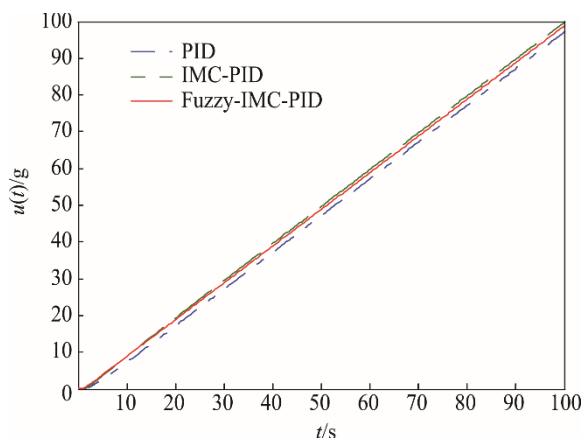


图 8 斜坡函数仿真曲线
Fig.8 Slope function simulation curve

在实际粉末包装计量控制系统中存在许多干扰,为了反映文中算法在抗干扰能力方面的优势,在实际仿真中,选择具有代表性的扰动阶跃干扰,加入了幅值为 0.1 的阶跃负载扰动。仿真结果见图 9,从仿真结果可以看出,模糊短反馈 PID 算法能够更快地在扰动出现时克服外在干扰,以较快的速度拉回正常值。

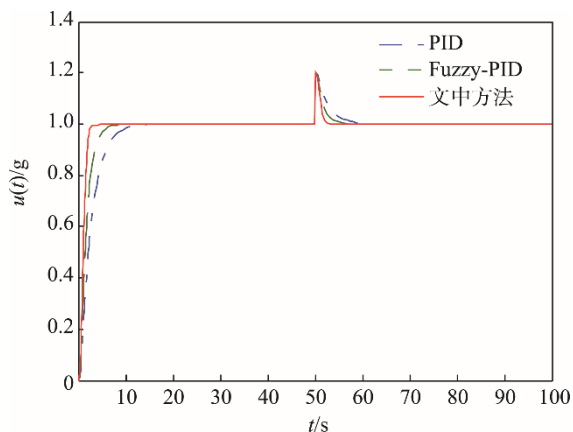


图 9 不同算法下的抗干扰能力
Fig.9 Anti-jamming ability under different algorithms

4.2 系统实验

为了验证文中提出的模糊短反馈 PID 控制器下粉末包装计量控制系统的实际应用效果,文中利用粉末包装计量 PLC 控制样机样机进行实验验证,实验数据见表 2。

表 2 称量数据
Tab.2 Weighing data

给定称量值	实际称量值	偏差
600	597	3
600	596	4
600	598	2
1500	1495	5
1500	1497	3
1500	1498	2

通过以上数据可以看出,给定称量值与实际称量值之间最大的误差在 5 g 以内,能够满足控制系统的实际需求。

5 结语

粉末包装计量控制系统是一个非线性的复杂控制系统,其控制性能的好坏直接影响着包装产品的质量。在传统的 PID 控制下,越来越难满足产品的精度要求,为了提高粉末包装计量的精度,结合先进的智能控制算法,提出了模糊短反馈 PID 的粉末包装计量控制系统。该控制器具有精确地控制精度等性能。通过实验仿真表明,模糊算法加入短反馈算法后能够比传统的一些控制器具有更加优良的控制性能(如超调量小、精度高、响应速度快等),能包装出令人满意的产品。

参考文献:

- [1] 张俊,熊家慧,郭爱云.定量包装控制系统的设计与实现[J].包装工程,2016,37(13):134—139.
ZHANG Jun, XIONG Jia-hui, GUO Ai-yun. Design and Implementation of Quantitative Packaging Control System[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 134—139.
- [2] 王述彦,师宇,冯忠绪.基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J].机械科学与技术,2011,30(1):166—172.
WANG Shu-yan, SHI Yu, FENG Zhong-xu. Research on Control Method Based on Fuzzy-PID Controller[J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(1): 166—172.
- [3] 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. Automatic Filling Machine Control System[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [4] 董婷. 一种自动称重包装控制系统设计[J]. 控制工程, 2017, 24(2): 372—377.
- DONG Ting. Control System Design of Automatic Weighing Packaging Machinery[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(2): 372—377.
- [5] 谭思云, 尤伟军, 王苏雅. 新型控制理论在超细粉末自动包装机中的应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(1): 59—61.
- TAN Si-yun, YOU Wei-jun, WANG Su-ya. Application Study of a New Control Theory in Automatic Packing Machine for Super-fine Powder[J]. Computer Measurement & Control, 2007, 15(1): 59—61.
- [6] 欧艳华. 基于神经网络的自适应PID控制器设计[J]. 机械设计与制造, 2014, 6(3): 263—265.
- OU Yan-hua. The Design of Adaptive PID Controller Based on Neural Network[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, 6(3): 263—265.
- [7] 彭博. 粉末包装精密计量系统的设计与分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- PENG Bo. Design and Analysis of Precise Metering System of Powder Packaging[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [8] 卫浩. 自动定量包装秤结构设计及系统研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- WEI Hao. Research on Structural Design and System of Automatic Quantitative Packing Scale[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [9] 王江华. 超细粉末自动包装配重系统的设计与研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- WANG Jiang-hua. Design and Research on Counterweight System of Ultrafine Powder Automatic Packaging Production Line[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [10] 杨世勇, 徐国林. 模糊控制与PID控制的对比及其复合控制[J]. 工业控制与应用, 2011, 30(11): 21—25.
- YANG Shi-yong, XU Guo-lin. Comparison Between Fuzzy Control and PID Control and Its Composite Control[J]. Industrial Control and Application, 2011, 30(11): 21—25.
- [11] 李国勇, 杨丽娟. 神经模糊预测控制及其MATLAB实现(第3版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- LI Guo-yong, YANG Li-juan. Neuro-Fuzzy Predictive Control and Its Realization in MATLAB(3rd Edition)[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
- [12] 刘宝, 丁永生, 王君红. 一种基于内分泌超短反馈机制的智能控制器[J]. 计算机仿真, 2008, 25(1): 188—191.
- LIU Bao, DING Yong-sheng, WANG Jun-hong. An Intelligent Controller Based on Endocrine Ultrashort Feedback Mechanism[J]. Computer simulation, 2008, 25(1): 188—191.
- [13] 刘志成, 孙大刚, 梁建宗. 气动人工肌肉仿生行走机构模糊PID控制[J]. 工业机械, 2012, 43(2): 29—33.
- LIU Zhi-cheng, SUN Da-gang, LIANG Jian-zong. Fuzzy PID Control for Bionic Walking Mechanism of Pneumatic Artificial Muscle[J]. Industrial Machinery, 2012, 43(2): 29—33.
- [14] FARHY L S. Modeling of Oscillations in Endocrine with Feedback[J]. Methods in Enzymology, 2004, 384: 54—81.
- [15] 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): 1—6.
- PENG Bo, ZHONG Fei. Powder Packaging Metering Control System Based on Fuzzy PID Control[J]. Package Engineering, 2017, 38(5): 1—6.