

基于模糊控制的失重秤粉体包装精度研究

陈静, 王志山, 徐雪萌, 唐静静, 孟坤鹏, 李飞翔
(河南工业大学, 郑州 450001)

摘要: **目的** 针对失重式包装秤控制系统控制精度低的问题, 提出一种提高粉体包装称量精度的控制算法。**方法** 在传统 PI 控制基础上, 增加智能模糊控制模块, 利用模糊控制算法整定 PI 控制参数, 并通过 Matlab simulink 分析软件对系统进行仿真。**结果** 相对于传统的 PI 控制器, 模糊 PI 控制系统达到稳定的时间减少了 44%, 超调量降低了 26%, 系统受到干扰后达到稳定的时间减少了 30%。**结论** 模糊 PI 控制系统稳定, 超调量小, 抗干扰能力强, 能有效提高失重秤的包装控制精度。

关键词: 粉体; 失重秤; 包装精度; 模糊控制

中图分类号: TB486⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)17-0153-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.022

Powder Packaging Accuracy of Weightless Scale Based on Fuzzy Control

CHEN Jing, WANG Zhi-shan, XU Xue-meng, TANG Jing-jing, MENG Kun-peng, LI Fei-xiang
(Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a control algorithm to improve the weighing accuracy of powder packaging regarding the problem of low control precision of the control system of weightless packaging scale. On the basis of traditional PI control, an intelligent fuzzy control module was added, the fuzzy control algorithm was used to set PI control parameters, and the system was simulated through Matlab simulink analysis software. Compared to traditional PI controllers, the time it took for the fuzzy PI control system to stabilize was reduced by 44%, the overshoot was reduced by 26%, and the time it took for the system to stabilize after being disturbed was reduced by 30%. The fuzzy PI control system is stable, has a small overshoot and strong anti-interference ability, and can effectively improve the packaging control precision of the weightless scale.

KEY WORDS: powder; weightless scale; packaging accuracy; fuzzy control

精确的动态称重计量是提高包装速度, 保证包装精度的关键技术之一, 也是当前包装面临的一个的难题, 尤其是粉体的包装物性受到粒度、湿度和温度等条件的影响, 从而导致包装精度难以控制。随着先进控制理论和技术的发展, 新型的智能控制算法逐渐被运用到包装设备的控制系统中, 一些学者对其进行了相关的研究: 如彭博等^[1-2]提出了将模糊控制算法、BP 神经网络结合粒子群算法运用到动态称量包装系

统中, 其中模糊控制算法通过 PLC 样机试验 500 次后控制偏差最大值为 5 g, 而 BP 神经网络结合粒子群算法在进行了 100 次数据采集实验后, 最大相对误差为 9%, 减小了相对误差; 马云飞等^[3-5]提出了将模糊模糊控制算法运用到皮带给料式定量包装控制系统中, 通过 Matlab 软件仿真得出其稳态误差减小了 80%; 周星等^[6]提出了把数字滤波技术运用到失重式计量加料系统中, 实验结果表明其平均偏差值比设

收稿日期: 2019-03-21

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

作者简介: 陈静 (1990—), 女, 河南工业大学硕士生, 主攻粮油食品包装工艺与装备。

通信作者: 王志山 (1963—), 男, 河南工业大学教授、硕导, 主要研究方向为包装机械。

定的控制偏差值降低了40%。上述文献表明,智能控制算法能够减小定量包装控制系统的误差值。

失重秤是20世纪80年代中期开始应用于工业生产中的一种连续称量计量设备,因失重仓重量的测量几乎是在静态下进行的,无需考虑传感器零点漂移,具有精度高、环保、节能、维护简单等优点^[7-8],失重秤逐渐成为连续称重设备的首选设备。由于在实际包装生产中,存在机器运行中引起的振动、系统的延迟等^[9]情况,所以其包装精度有待进一步提高。

文中在传统PI控制的基础上,增加模糊控制智能算法实时整定PI控制参数,以此来优化控制系统,从而提高粉体失重秤定量包装的精度。

1 失重式计量包装系统的传统PI控制

失重秤由失重仓、压力传感器、控制系统和出料喂料机组成。其工作原理是单位时间内失重仓的重量损失量,控制系统根据实际流量与设定流量的大小对比,实时控制出料喂料机转速,达到定量给料的目的^[10-13]。失重秤的核心是控制系统,当压力传感器将失重仓内的实际物料流失量信号传给信号采集系统时,信号处理系统会根据实际损失量与设定量计算出系统的误差。目前的失重秤的控制方法通常采用PID控制^[14-16],通过对比实际与设定的单位时间内失重仓的损失量得出偏差值,来整定比例系数 K_p 、积分系数 K_i 与微分系数 K_d ,对被控对象出料喂料机的转速进行调整,以满足控制精度。因为PID控制系统简单、使用方便等特点,PI控制器也是目前应用较广泛的控制器。

失重式喂料控制系统中,采用PI控制(比例积分控制),其数学表达式为:

$$U(t) = P \left(e + \frac{1}{I} \int_0^t e dt \right) \tag{1}$$

式中: P 为控制器的比例系数; I 是积分时间。在PI控制中,既有比例控制作用的及时性和快速性,又有积分控制作用,能消除静差。在工业生产上常用在流量、压力、温度的控制中。

其拉普拉斯变换后函数形式为:

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

在理想状况下,系统会将单位时间内失重仓流下的物料量与设定流量值进行比较,得到一个偏差值,通过偏差值来实时控制喂料螺旋电机的转速,是一个理想的线性控制;在实际生产中,由于设备安装或者系统延迟等因素的影响,系统呈现出非线性的特点。为解决问题,文中结合模糊控制算法进行控制器设计。

2 模糊PI控制器的设计与实现

传统的PID控制需将参数值提前置于控制器中,但是当系统结构或参数发生变化时,传统PID不能自动调节。误差发生变化时系统就不能得到很好的控制,不能很好地解决计量系统动态和静态之间的矛盾^[3]。由于失重秤的控制过程具有动态称量和非线性这两大特点,因此传统PID控制就不能达到相对理想的控制效果。由于模糊控制对系统的非线性和时变性有较好的适应能力且鲁棒性好^[4],所以将模糊控制运用到失重秤定量包装中,能更好地提高系统的稳定性。

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言及模糊逻辑推理控制为基础的一种智能控制算法,其模糊PI控制框图见图1。

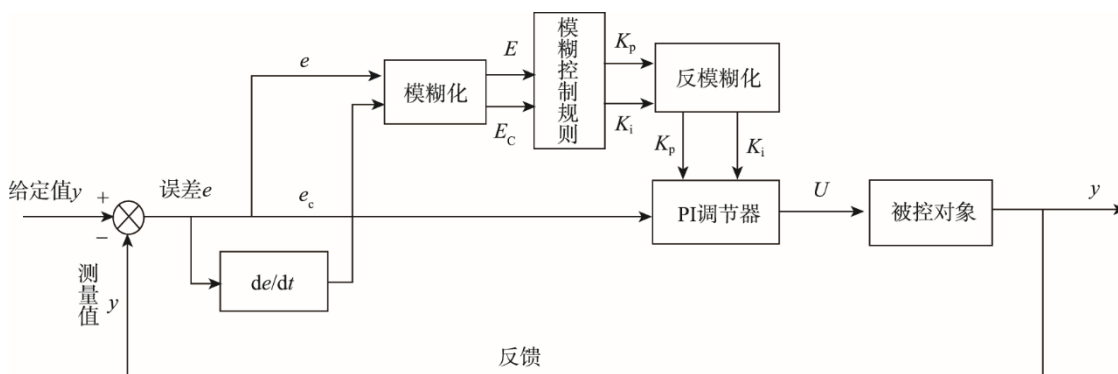


图1 模糊PI控制框图
Fig.1 Fuzzy PI control chart

2.1 输入输出变量的确定

根据目前实际误差分析,设定实际论域为 $[-0.06 \text{ kg}, 0.06 \text{ kg}]$,实际偏差 e_c 的基本论域为 $[-1, 1]$,设输入变量为 e 和 e_c ,模糊论域为 $[-6, 6]$;输出模糊语言变量为 K_p 与 K_i ,设定其模糊变量为 $[-6, +6]$,故偏

差 e 的量化因子 $K_e=0.01$,偏差变化量的量化因子 $K_{ec}=1$ 。输出变量设置为 K_i, K_p 等2个参数。

K_e 与 K_{ec} 所对应的模糊子集如下所示:

$K_e, K_{ec} = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$

K_i, K_p 的模糊子集如下所示:

$K_i, K_p = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$

其中：NB 表示负大对应到模糊论域中为 -1；NM 表示负中对应到模糊论域中为 -2/3；NS 表示负小对应到模糊论域里为 -1/3；ZO 表示 0 对应到模糊论域中为 0；PS 表示正小对应到模糊控制中为 1/3；PM 表示正中对应到模糊控制中为 2/3；PB 表示正大对应到模糊控制中为 1。

2.2 选择合适的隶属度函数

常见的隶属度函数有高斯形和三角形，其中高斯形函数易于实现，其中心线和宽度构成一个简单的参数集合以进行初始化，适当地选择中心和宽度则高斯函数也同样极具灵活性^[17]，但是在工程中往往采用形式上简单的三角形隶属度函数。研究中结合 2 种隶属度函数进行设置，具体见图 2—3。

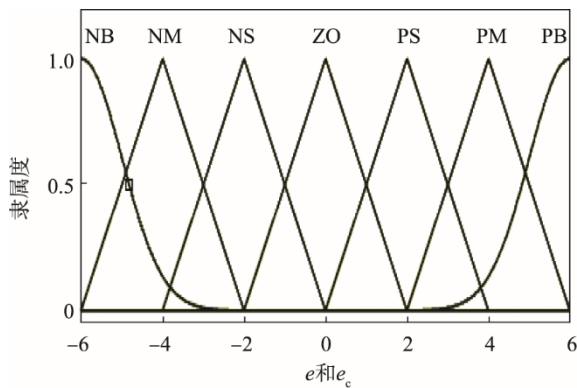


图 2 e 和 e_c 隶属度函数
Fig.2 e and e_c membership function

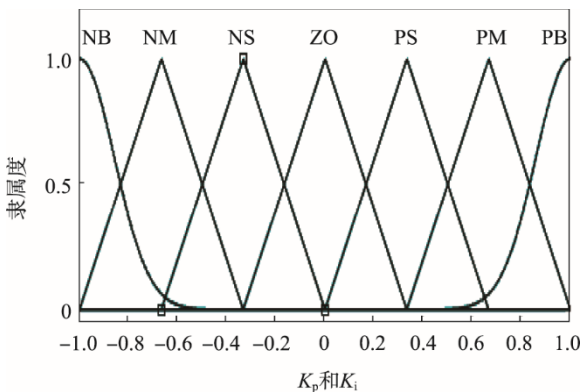


图 3 K_p 和 K_i 的隶属度函数
Fig.3 K_p and K_i membership function

2.3 模糊控制规则的确定

根据 PID 参数经验知识，总结实际失重秤下料系统中的瞬时流量变化规律，结合 PID 调节规律，可以总结出失重秤下料系统模糊 PI 控制器的 2 个参数控制规则表，见表 1 和表 2。

将设定的模糊规则输入 Matlab 的 fuzzy logicdesigner 模块中，采用的推理方法为 Mamdani 法可以得到 e 、 e_c 与 K_i 、 K_p 之间的关系，由模糊控制

规则表可以得出 49 条规则，通过仿真可以得出 K_p 和 K_i 的模糊查询表， K_p 的模糊查询表见表 3。

表 1 K_p 的模糊控制规则
Tab.1 K_p fuzzy control rules

K_p	e_c						
	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	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
e	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 K_i 的模糊控制规则
Tab.2 K_i fuzzy control rules

K_i	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	NS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
e	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

由于 K_p 、 K_i 的模糊查询表都可以在 Matlab 中模糊规则建立起来后，从 rule viewer 的窗口中变换 e 和 e_c ，从 -6~6 的范围中得出，所以就只列出 K_p 的模糊查询表。上述模糊控制查询表得出的 K_p 、 K_i 也就是模糊控制器中的 PI 参数调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 。

将参数代入计算：

$$K_p = k_p + \Delta K_p \tag{3}$$

$$K_i = k_i + \Delta K_i \tag{4}$$

式中： k_p 和 k_i 为 PI 参数的初始值，根据传统的 PI 控制器的参数整定方法设计， ΔK_p 、 ΔK_i 为模糊处理器的输出。在失重秤的工作过程中，可以根据查询表得到 2 个参数的实时调整，从而实现对失重秤的实时控制。

3 模糊 PI 失重秤粉体包装控制系统模拟仿真

为了验证模糊 PI 控制在失重秤下料过程中能有效地控制下料速度和系统受到干扰后很快恢复到稳定值，设计了传统 PI 与模糊 PI 的仿真模型进行对比。

表3 K_p 的模糊查询
Tab.3 K_p fuzzy query

e	e_c												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	0.893	0.877	0.893	0.711	0.667	0.666	0.667	0.5	0.333	0.167	0	0	0
-5	0.877	0.877	0.877	0.711	0.667	0.5	0.512	0.5	0.333	0.161	-0.066	-0.155	-0.155
-4	0.893	0.877	0.893	0.711	0.667	0.5	0.39	0.406	0.333	0.161	-0.057	-0.179	-0.276
-3	0.711	0.711	0.711	0.711	0.666	0.5	0.341	0.172	0.167	0	-0.167	-0.167	-0.326
-2	0.667	0.667	0.667	0.666	0.667	0.5	0.334	0.167	0	-0.167	-0.333	-0.333	-0.333
-1	0.666	0.666	0.666	0.5	0.5	0.333	0.167	0	-0.167	-0.333	-0.5	-0.5	-0.5
K_p 0	0.667	0.667	0.667	0.5	0.334	0.167	0	-0.167	-0.334	-0.5	-0.667	-0.667	-0.667
1	0.5	0.5	0.5	0.333	0.167	0	-0.167	-0.167	-0.334	-0.5	-0.666	-0.666	-0.666
2	0.333	0.333	0.333	0.166	0	-0.167	-0.334	-0.334	-0.334	-0.5	-0.667	-0.667	-0.667
3	0.326	0.167	0.167	0.005	-0.172	-0.333	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.672	-0.711	-0.711
4	0.276	0.179	0.057	-0.224	-0.39	-0.5	-0.667	-0.666	-0.667	-0.672	-0.671	-0.723	-0.893
5	0.155	0.155	0.066	-0.328	-0.511	-0.5	-0.667	-0.666	-0.667	-0.711	-0.723	-0.723	-0.877
6	0	0	0	-0.333	-0.666	-0.666	-0.667	-0.666	-0.667	-0.711	-0.893	-0.877	-0.893

由于失重秤的动态特性,半实验建模是最适合的建模方法。半实验建模的方法可以省去对复杂失重秤物料流动的机理分析,适用于对失重秤系统的建模,参考文献[18]建模得出的一种失重秤近似数学模型^[18]:

$$G(s) = \frac{0.078}{10s+1} e^{-2s} \quad (5)$$

其中: 0.078 为系统的比例系数; -2 s 是系统的滞后时间; 10 s 是系统达到稳态的时间。

在 Simulink 仿真时, 首先用各种模块搭建起模糊 PI 控制器模型^[19], 见图 4。在控制模型中模糊 PI 控制器中的 ΔK_p , ΔK_i 与传统 PI 控制器中参数一

致。运行结果见图 5。

由图 5 可知, 在同样的 PI 初始参数下, 模糊 PI 控制系统比传统 PI 控制系统达到稳定的时间减少了 44%, 超调量降低了 26%。为了检验系统的稳定性, 在系统 80 s 处加入了 1 倍干扰信号, Simulink 运行结果见图 6。由图 6 可知, 在系统受到干扰信号后, 阶跃响应曲线发生突变, 相较于传统的 PI 控制, 模糊 PI 控制到达稳定的时间降低了 30%。通过模拟仿真可知, 模糊 PI 能够使系统响应速度快, 到达稳定的时长缩短, 且当系统受到干扰的时候, 系统也能快速响应, 以最快的时间达到稳定状态。

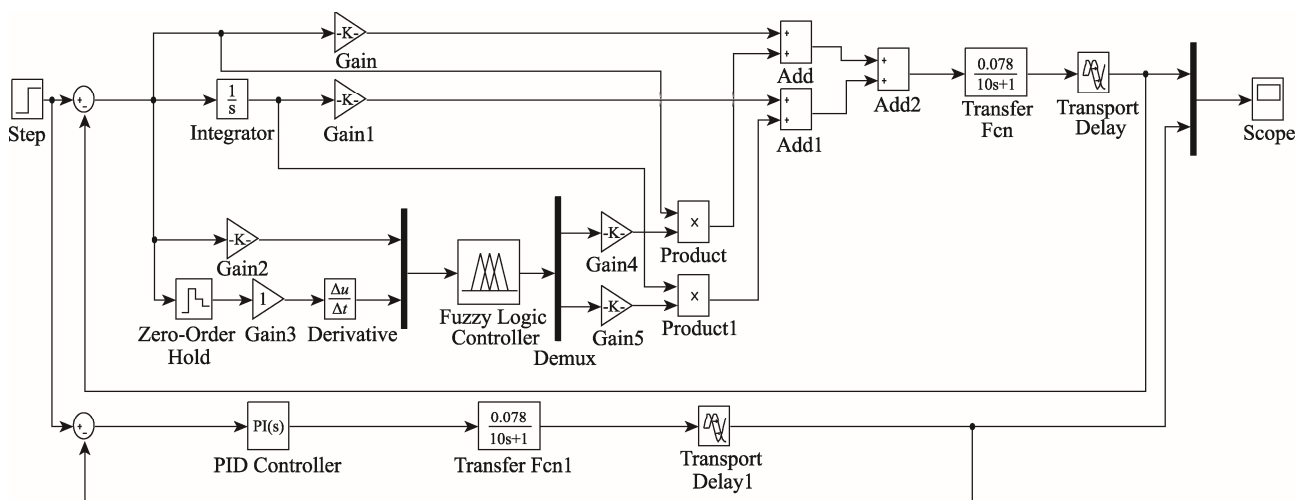


图4 失重秤计量控制系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of measurement control system of weightless scale

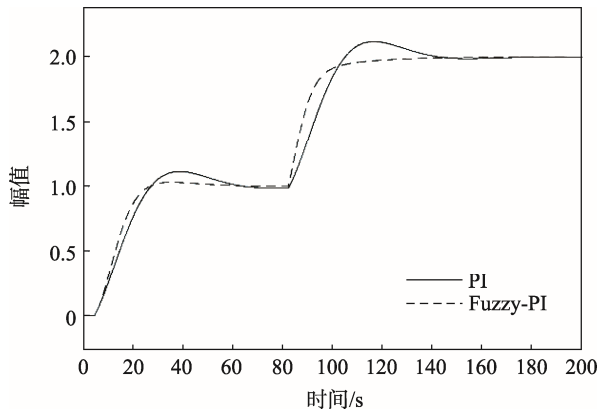


图5 系统的阶跃响应曲线
Fig.5 Step response curve of the system

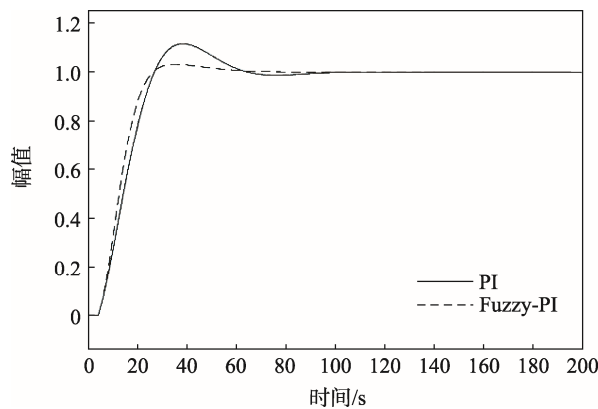


图6 受干扰系统的阶跃响应曲线
Fig.6 Step response curve of disturbed system

4 结语

针对失重式粉体包装秤控制系统中,系统滞后与设备振动等影响控制精度的问题,在现有失重秤传统PI控制的基础上增加了模糊PI控制器。仿真结果表明,相较于现有的失重秤传统PI控制系统,设计的模糊PI控制使系统达到稳定的时间减少了44%,超调量降低了26%,在系统受到干扰后,模糊PI控制能使系统在短时间内达到稳定,稳定时长减少了33%。

模糊PI控制方法能使失重秤控制系统响应速度快,超调量小且系统达到稳定状态的时间短。这主要是因为模糊控制算法能实时调节PI的控制参数,使系统得到优化,保证了失重秤能快速稳定地工作,从而提高失重秤称量的效率和精度。

参考文献:

[1] 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.
PENG Bo, ZHONG Fei. Powder Packaging Metering Control System Based on Fuzzy PID Control[J].

Packaging Engineering, 2017, 38(5): 11—16.
[2] 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): 88—91.
LIU Jiang, LI Hai-long. PID Control Algorithm of BP Neural Network of Dynamic Quantitative Weighing Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 88—91.
[3] 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.
MA Yun-fei. Research on Simulation of Fuzzy-PID-Control for Belt Batching with MATLAB[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
[4] 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. Research on Optimization of Feeding Belt Quantitative Packaging Scale Based on Fuzzy Control[J]. Electrical Automation, 2015, 37(1): 24—26.
[5] 李牡丹. 基于模糊PID控制的智能化配料秤仪表的设计与实现[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
LI Mu-dan. Design and Realization on Intelligent Proportioning Belt Weighing Instrument Based on Fuzzy PID Control[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
[6] 周星, 许红, 王克俭, 等. 数字滤波技术在失重式计量加料系统中的应用[J]. 中国塑料, 2008(6): 83—86.
ZHOU Xing, XU Hong, WANG Ke-jian, et al. Application of Digital Filtering Technology in Weight-loss Metering Feeding[J]. China Plastics, 2008(6): 83—86.
[7] 胡云燕, 储李德. JSKJ失重式煤粉定量喂料控制系统[J]. 水泥, 2011(8): 54—57.
HU Yun-yan, CHU Li-de. Weightless Quantitative Feeding Control System for Pulverized Coal[J]. Cement, 2011(8): 54—57.
[8] 赵进奎. 失重秤及其在水泥熟料配料系统中的应用[J]. 自动化仪表, 1999(4): 26—28.
ZHAO Jin-kui. The Weightlessness Scale and Its Application in the Slacking Material Blending System of Cement Process[J]. Process Automation Instrumentation, 1999(4): 26—28.
[9] 季婷婷, 唐正宁, 谢春玉. 失重秤的动态特性研究与参数设计[J]. 轻工机械, 2017, 35(5): 28—31.
JI Ting-ting, TANG Zheng-ning, XIE Chun-yu. Dynamic Characteristics Research and Parameter Design of Loss-in-Weight Feeder[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(5): 28—31.
[10] HANSON J. Control of a System of Loss-in-weight Feeders for Drug Product Continuous Manufacturing[J]. Powder Technology, 2018, 331: 236—243.
[11] 袁曙光, 陈文成, 刘朝阳, 等. 连续式失重秤在粉煤灰计量中的应用[J]. 新世纪水泥导报, 2013, 19(1): 62—63.
YUAN Shu-guang, CHEN Wen-cheng, LIU Zhao-yang,

- et al. Application of Continuous Weighing Scale in Fly Ash Measurement[J]. Cement Guide for New Epoch, 2013, 19(1): 62—63.
- [12] 唐超, 孟辉. 失重式给料机[J]. 起重运输机械, 2002(5): 14—16.
TANG Chao, MENG Hui. Weight Loss Feeder[J]. Lifting the Transport Machinery, 2002(5): 14—16.
- [13] 陆永耕. 失重秤配料装置的设计与应用[J]. 中国仪器仪表, 2001(4): 22—24.
LU Yong-geng. The Design and Application of the Weight-lost Weigher China Instrumentation, 2001(4): 22—24.
- [14] 王金林. 失重秤应用实例分析[J]. 衡器, 2010, 39(3): 23—24.
WANG Jin-lin. Analysis of Weightlessness Scale Application Examples[J]. Weighing Apparatus, 2010, 39(3): 23—24.
- [15] 李新桥, 任芊, 黄友之. 新型失重式连续称重配料系统的研究[J]. 新技术新工艺, 2005(6): 35—36.
LI Xin-qiao, REN Qian, HUANG You-zhi. Study on a New Weight-loss Continuous Blending System[J]. New Technology & New Process, 2005(6): 35—36.
- [16] 刘汉忠, 俞鹏. 模糊 PID 自适应控制在微型齿轮泵恒流控制系统中的应用[J]. 流体机械, 2018, 46(12): 50—53.
LIU Han-zhong, YU Peng. Application of Fuzzy-PID Adaptive Control in Constant Current Control System of Micro Gear Pump[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(12): 50—53.
- [17] 张国良, 曾静, 柯熙政. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
ZHANG Guo-liang, ZENG Jing, KE Xi-zheng. Fuzzy Control and Its Application in MATLAB[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [18] 严虎. 基于 MATLAB 的失重秤控制器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
YAN Hu. Research on Loss in Weight Controller Based on Matlab[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [19] 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.
SUN Zhong-xiao. Simlink Simulation and Code Generation Techniques Beginning to Proficiency[M]. Beijing: Beihang University Press, 2015.