

包装过程自动控制技术专题

基于模糊 PID 控制的粉末包装计量控制系统

彭博, 钟飞

(湖北工业大学, 武汉 430068)

摘要: **目的** 针对粉末包装计量控制系统中由于粉末的流量与螺杆的转速存在着一定非线性的特点, 提出一种基于模糊 PID 的粉末计量包装控制系统。**方法** 该粉末包装计量控制系统由螺杆计量机构、称重机构和信号采集处理单元等组成, 根据系统特性, 结合模糊逻辑构建模糊自适应调整机构对 PID 控制器参数进行在线调整, 以适应系统特性的非线性变化, 并基于 Matlab 对控制系统进行仿真。**结果** 样机计量控制时偏差度最大为 0.8%, 仿真结果表明模糊 PID 较传统 PID 具有更好的效果。**结论** 该控制系统实际控制工作稳定, 鲁棒性较好, 可以满足实际控制系统的需要。

关键词: 粉末计量; 控制系统; 模糊 PID; Matlab

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0001-06

Powder Packaging Metering Control System Based on Fuzzy PID Control

PENG Bo, ZHONG Fei

(Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a power metering and packaging control system based on fuzzy PID, regarding the non-linear characteristics of the powder flow rate and the screw speed in such system. The powder packaging metering control system consisted of screw metering mechanism, weighing mechanism and signal acquisition and processing unit, etc. According to the system characteristics and combined with the fuzzy logic, the fuzzy adaptive adjustment mechanism was established to adjust the PID controller parameters online, so as to adapt to the non-linear change in the system characteristics. Based on Matlab, the control system was simulated. The maximum deviation was 0.8% in the process of prototype metering control. The simulation results showed that the fuzzy PID had better effects than the traditional PID. The actual control of the control system is stable and robust, and can meet the needs of the actual control system.

KEY WORDS: powder metering; control system; fuzzy PID; Matlab

现代包装工业中,越来越多的粉末物料包装机械被引进企业,以满足包装行业日益增长的粉末物料高速包装的需求。粉末物料的包装精密计量环节在一定程度上影响着包装的质量与产量。近 10 年来,我国已从日本、英国等地引进了多种粉末物料的精密计量系统。动态计量系统对运动的物料进行实时称量,从实际生产应用效果来看,因其计量精度高、计量缓慢、成本较高等,因而并没有得到广泛推广^[1]。中国的包

装精密计量技术发展较缓慢,目前国内包装精密计量技术研究和设备开发相对较少,计量精度和稳定性也不高。

粉末包装计量系统根据预先设定的物料量,实时对粉末物料的称量进行修正,以达到准确控制的目的,使产品的质量和包装效率得到保证。为了进一步提高粉末物料在包装过程中的精度,文中在螺杆多级给料称量方式的基础上,以粉末包装物料为对象,研究了

收稿日期: 2016-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(51275158)

作者简介: 彭博(1990—),男,湖北工业大学硕士生,主攻机械自动化。

通讯作者: 钟飞(1970—),男,工学博士,湖北工业大学教授,主要研究方向为包装机械制造及其自动化。

基于模糊 PID 的自适应模糊控制算法,探讨模糊控制和 PID 复合控制在对粉末包装精密计量的控制效果,以期对粉末物料的精密计量系统设计提供借鉴。

1 模糊 PID 粉末包装计量控制系统

1.1 传统 PID 在粉末包装计量控制中的运用

粉末包装计量控制系统由螺杆计量机构、称量机构和信号采集处理单元等组成,见图 1。其中异步电动机、减速箱、变频器、螺杆等构成螺杆出料机,出料筒、包装带和夹带等构成称量容器。称量控制系统是整个控制系统的核心。信号采集处理单元接收各称量传感器、限位阀、开关的信号,同时计算出粉末物料计量值的误差。称量控制系统根据误差,通过执行机构控制螺杆出料机构动作,实现粉末的精准计量。传统的 PID 控制直接对被控对象进行闭环控制^[2],它根据粉末包装计量在控制过程中检测的实际称量值与设定称量值之间的偏差,通过整定的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d ,对被控制对象(一般为螺杆的转速)进行调整,以达到粉末包装的计量精度要求,见图 2,是目前广泛应用的一种控制器。

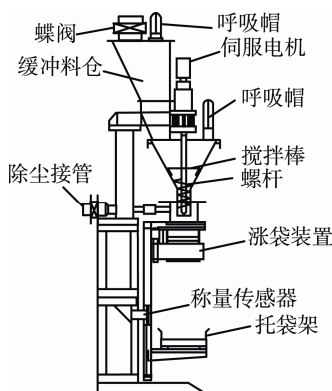


图 1 粉末包装计量系统组成

Fig.1 Schematic of powder packaging metering system

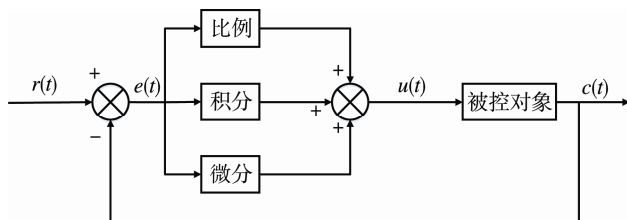


图 2 传统 PID 控制结构

Fig.2 Traditional PID control structure

粉末包装计量系统数学模型可以表示为:

$$P(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

在系统动态称量时,将半粉末包装计量系统控制器设定的称量值与称量传感器测得的实际称量值进行对比发现,该 2 个值会产生一个偏差值,将此偏差

的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量,来完成对粉末包装计量机螺杆计量电机的控制。常规 PID 控制参数只能利用一组固定的参数进行控制,而这些参数在调整不当时不能很好地解决计量系统动态和静态性能之间的矛盾,当参数变化超过一定范围时,系统性能就会明显下降^[3-4]。以往的粉末包装计量系统利用传统 PID 控制,根据包装计量机压力传感器的反馈信息对计量螺杆的转速进行校正,从而通过控制包装计量对象的流量来控制包装计量对象的计量精度。这是一个线性控制系统,但是理想的线性系统实际上是不存在的,包装粉末计量的流量与螺杆的转速并不是一个理想的线性关系。为克服传统 PID 的稳态精度低、抖动和积分饱和等不足,利用模糊控制和 PID 控制复合的策略进行优化控制。

1.2 模糊控制器的设计

模糊控制系统^[5]摆脱了对数学模型一定程度精确度的要求,将模糊控制器的控制量化等级离散化,结合 PID 控制的良好静态控制效果可以很好地解决各自在控制过程中的不足。模糊控制系统利用模糊控制器代替传统闭环控制系统中的模拟式控制器,根据模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改,是其控制特点所在。该粉末包装计量控制系统的模糊控制器设计如下所述。

1) 确定粉末计量系统的输入输出语言变量。采用二维模糊控制器作为 PID 参数整定方式,选取粉末计量控制系统的实际称量值与设定称量值偏差 e 和称量值偏差变化率 e_c 等 2 个输入变量,选取 PID 控制器的 3 个参数 K_p , K_i , K_d 为 3 个输出变量。根据实际情况,设定 e 的实际论域: $e \in [-60 \text{ g}, 60 \text{ g}]$, e_c 的实际论域变化范围为 $e_c \in [-6, 6]$ 。将 e 和 e_c 量化到模糊论域。先确定 e 和 e_c 的模糊论域为:

$e = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ (其中 -6 表示偏差负 60 g, -5 表示偏差负 50 g, 依次类推)

$e_c = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ (其中 -6 代表偏差变化为 -6, 同理,其他数字依次类推)

对应的模糊子集为:

$K_e = \{\text{负大 (NB)}, \text{负中 (NM)}, \text{负小 (NS)}, \text{零 (ZO)}, \text{正小 (PS)}, \text{正中 (PM)}, \text{正大 (PB)}\}$

$K_{ec} = \{\text{负大 (NB)}, \text{负中 (NM)}, \text{负小 (NS)}, \text{零 (ZO)}, \text{正小 (PS)}, \text{正中 (PM)}, \text{正大 (PB)}\}$

其量化因子分别为 $K_e=0.1, K_{ec}=1$ 。 K_p , K_i , K_d 的模糊论域为 $[-1, 1]$ 。相应的模糊子集为:

$K_p' = \{\text{负大 (NB)}, \text{负中 (NM)}, \text{负小 (NS)}, \text{零 (ZO)}, \text{正小 (PS)}, \text{正中 (PM)}, \text{正大 (PB)}\}$

$K_i' = \{\text{负大 (NB)}, \text{负中 (NM)}, \text{负小 (NS)},$

零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB) }
 $K_d' = \{ \text{负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB)} \}$
其中负大对应模糊论域中的-1、负中表示-2/3、负小表示-1/3、零表示 0、正小表示 1/3、正中表示 2/3、正大表示 1。

2) 确定隶属度函数。隶属度函数有正态分布形、高斯形、梯形、三角形等, 一般认为正态分布形和高斯形最好, 但难于计算, 三角形次之, 最后是梯形。在这里, 为了计算方便, 选用三角形和高斯形相结合的隶属度函数。输入变量误差 e 和误差变化率 e_c 隶属度函数采用图 3a 所示的隶属度曲线, 输出变量 K_p, K_i, K_d 隶属度函数采用图 3b 所示的隶属度曲线。隶属度函数曲线的形状较尖的模糊子集其分辨率较高, 控制灵敏度较高。

3) 建立模糊控制规则表。模糊 PID 控制的核心就是利用模糊规则实时在线调整 PID 参数, 根据不同时刻的粉末计量值偏差和偏差的变化对参数的影响, 结合经验, 采用的初始模糊控制见表 1。再根据解模糊算法合成, 求得 PID 参数模糊矩阵表。

表 1 K_p, K_i, K_d 的模糊控制
Tab.1 Fuzzy control of K_p, K_i and K_d

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	NS/PS/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/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

2 模糊 PID 粉末包装控制系统仿真

2.1 模糊 PID 控制系统的设计

把采样得到称量值偏差和称量值偏差的变化率经过量化之后, 代入模糊控制的规则表, 根据模糊理论进行算法合成, 得出新的 PID 参数, 再经过 PID 算法计算出最后的输出量, 从而控制被控对象 (一般为螺杆的转速)。粉末包装称量控制系统模糊 PID 控制原理见图 4^[6-8]。

2.2 Matlab 模糊 PID 控制模块的建立

粉末包装计量控制系统的模糊 PID 控制过程中, 确定模糊语言变量之后, 将变量进行模糊处理, 依据模糊控制规则表计算出输出量的模糊值并解模糊。确

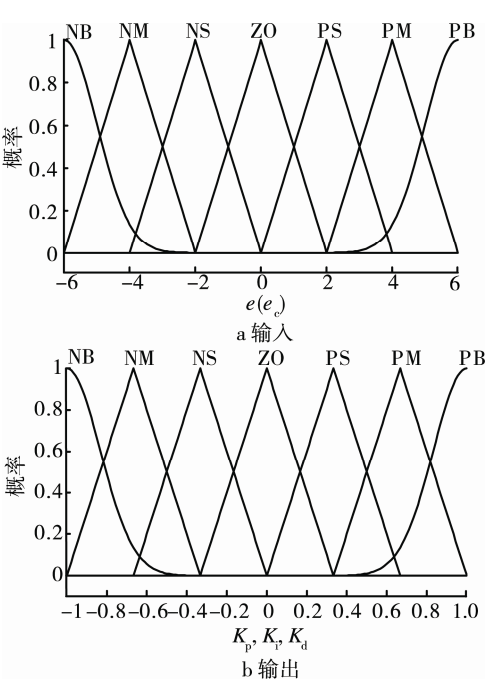


图 3 隶属度曲线
Fig.3 Membership degree curve

定输入语言变量的范围为[-6, 6], 输出语言变量的范围为[-1, 1]。

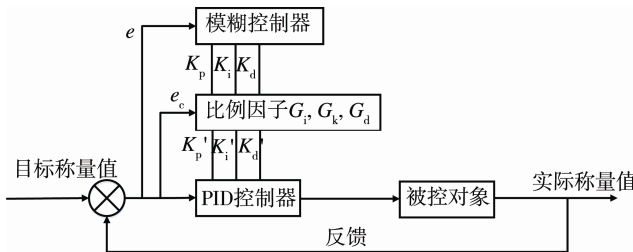


图 4 模糊 PID 控制原理
Fig.4 Schematic diagram of fuzzy PID control

依据粉末包装计量系统的要求, 该模糊 PID 控制器采用三角形隶属度函数和高斯形隶属度函数相结合的隶属度函数, 修改各模糊子集的名称。依据经验

给出的模糊控制规则表, 列出 49 条控制语句, 将控制语句输入模糊规则编辑器中。完成模糊控制规则的编辑之后, 打开模糊规则观察器, 当输入变量取不同数值时, 选取重心法, 系统会求出各输出变量的值。

得到比例 K_p -积分 K_i -微分 K_d 系数调校参数的控制, 见表 2(这里只列出 PID 控制比例系数 K_p 的控制表, PID 控制积分参数 K_i 和 PID 控制微分参数 K_d 的控制表求法类似)。

表 2 K_p 比例系数调校参数控制
Tab.2 K_p proportional coefficient adjustment parameter control

调校参数	E	E_C													
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
K_p	-6	1.000	1.000	1.000	0.667	0.667	0.667	0.667	0.167	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	-5	1.000	1.000	1.000	0.667	0.667	0.667	0.667	0.167	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	-4	1.000	1.000	1.000	0.667	0.667	0.667	0.167	0.167	0.000	0.000	0.000	-0.333	-0.333	
	-3	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.167	0.000	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333	
	-2	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.167	0.000	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333	
	-1	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.167	0.000	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333	-0.333	
	0	0.667	0.667	0.667	0.167	0.167	0.167	0.000	-0.333	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	
	1	0.167	0.167	0.167	0.000	0.000	0.000	-0.333	-0.333	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	
	2	0.167	0.167	0.000	-0.333	-0.333	-0.333	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-1.000	-1.000	
	3	0.167	0.167	0.000	-0.333	-0.333	-0.333	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-1.000	-1.000	
	4	0.167	0.167	0.000	-0.333	-0.333	-0.333	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-1.000	-1.000	
	5	0.000	0.000	0.000	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	
	6	0.000	0.000	0.000	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-0.667	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	

在 Matlab 中采用图形界面建立模糊推理系统, 由 FIS 编辑器中可观察到该粉末包装计量 FUZZY-PID 控制系统的输出曲面规则视图, 见图 5。根据模糊控制规则, 该模糊控制对比例-积分-微分控制器的 3 个参数比例参数 K_p 、微分参数 K_i 、积分参数 K_d 进行实时调校。图 5a 反映了建立模糊控制规则的基本思想。当误差为负时, 若误差为负大, 且误差变化率也为负, 这时的误差有增大的趋势, 所以控制量的比例变化取正大; 若误差变化率为正, 表示系统

本身已有减少误差的趋势, 所以要选取较小的控制量比例。图 5b 表明每次 PID 运算时, 在原来的积分值的基础上, 增加一个与当前的误差值成正比的微小部分。若误差为负值时, 积分的增量为负。同理, 误差为正时, 积分的增量为正。图 5c 表明, 误差的微分就是误差的变化速率, 误差变化越快, 其微分绝对值越大。误差增大时, 其微分为正; 误差减小时, 其微分为负。控制器输出量的微分部分与误差的微分成正比, 反映了被控量变化的趋势。

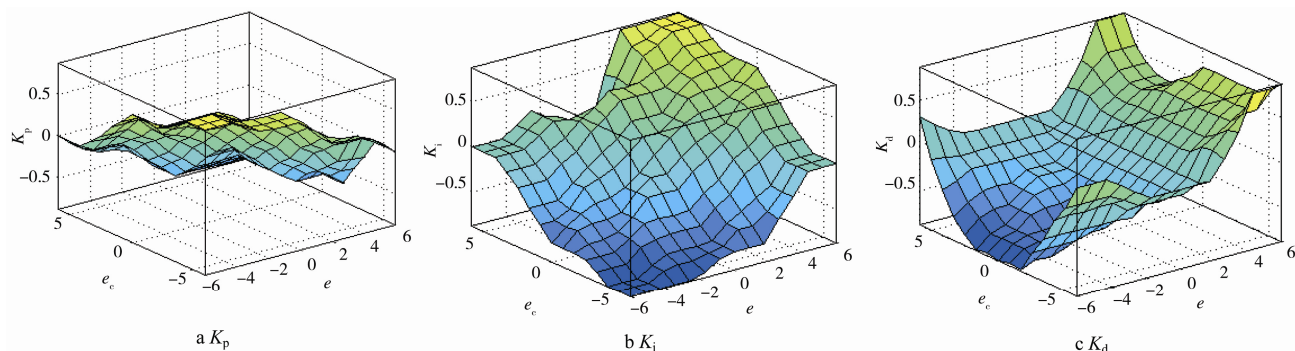


图 5 曲面规则视图
Fig.5 Surface rule view

2.3 SIMULINK 仿真

在 Matlab/SIMULINK 环境下, 先建立模糊 PID 控制器系统模型^[9-12], 再将粉末计量模型和模糊 PID 控制器系统模型通过运算结合得到粉末包装计量系统控制模型见图 6。

通过系统辨识, 得到系统的传递函数:

$$G(s) = \frac{0.00026}{0.06s^3 + 0.3s^2 + 0.73s}$$

SIMULINK 仿真时, 采用临界比例带法, 确定 PID 的 3 个参数初始值 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d , 然后设置模糊 PID 控制的参数的初值 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d , 设置

为与传统 PID 参数一致，输入信号（step）设置为幅值为 1 的阶跃输入，后期在 8 s 处再加上 0.5 倍阶跃干扰，可以很明确观察到控制效果。粉末包装计量模

糊自整定 PID 控制系统与传统常规 PID 控制系统的动态响应曲线见图 7。

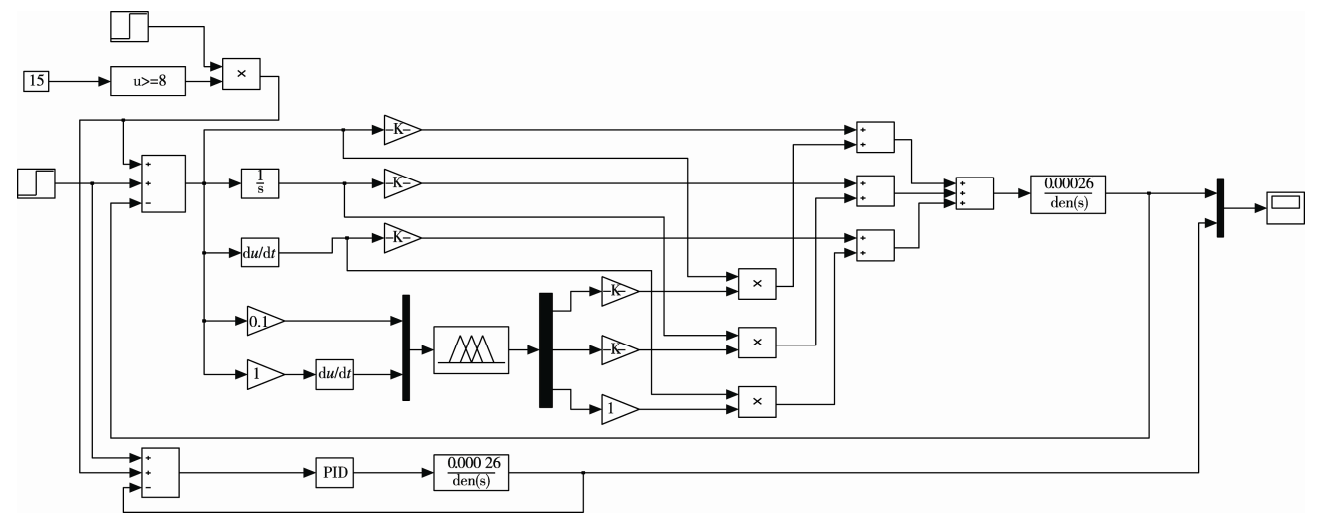


图 6 粉末包装计量控制系统仿真模型
Fig.6 Simulation model of powder packaging metering control system

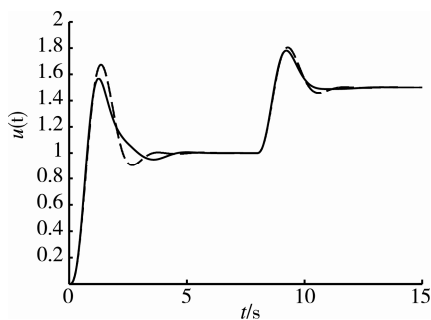


图 7 系统加入干扰后的阶跃响应
Fig.7 System step response diagram after adding interference

通过仿真对比结果可以看出，初始时刻，模糊自整定 PID 控制也有一定的超调量。虽然比传统 PID 控制小，但是到达稳定的时间反而较长，但是在后期 8 s 时刻加入 0.5 倍的阶跃干扰之后，不难看出模糊自适应 PID 比传统的 PID 控制响应更快达到稳定。值得注意的是，模糊自整定 PID 控制品质的好坏，与 PID 各参数的初始论域有关，与初始整定的最优 PID 参数也有关。分析其原因，不同的模型有不同的模糊规则，文中的模糊自适应 PID 控制的模糊规则借鉴了前人总结的经验，针对该模型，应该有更合适的模糊规则可达到超调量更小和稳定性更好。

3 系统试验

选择粉末包装计量 PLC 控制^[13-15]样机进行试验，系统实验数据见表 3。可以看出在控制称量次数 500 次后控制偏差值最大为 5 g，采用此控制系统可以满

足实际需要。

表 3 称量数据
Tab.3 Weighing data g

给定称量值	实际称量值	偏差最大值
500	496	4
500	497	3
500	497	3
2000	1998	2
2000	1995	5
2000	1999	1

4 结语

为了进一步满足粉末计量的精度要求，文中对粉末包装计量控制系统进行了研究，提出了将模糊控制与传统 PID 控制相结合来控制粉末包装机计量的精度方法，并设计了模糊 PID 控制器，该控制器具有较好的动态性能。试验结果表明，基于模糊 PID 控制系统通过实时调整调校参数 K_p , K_i , K_d 实现实时调整 PID 控制参数，将粉末计量的误差控制在较小范围以内，系统超调量小，稳定性高，整机控制效果良好。较常规 PLC 控制系统的样机，计量精度得到明显提高，显著改善了系统控制品质，且成本较低。计量精度的提高可以较好地满足粉末精准计量要求，具有较好的市场应用价值。同时文中也存在着不足，该粉末包装计量控制系统采用的是前人总结的模糊控制规则，该物理模型还有更加完善的模糊控制规则需要深入学习与挖掘。

参考文献:

- [1] 罗家佳. 电子定量包装秤动态称重系统及数据处理方法的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
LUO Jia-jia. Study on the Dynamic Weighing System and Data Processing Methods of Electronic Quantitative Packaging Machine[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [2] MARTINEZ A S, JAMSHIDI M. Design of Fuzzy Logic Based Engine Idle-speed Controllers[J]. Symposium on Circuits & Systems, 1993, 2(2): 1544—1547.
- [3] 赵健, 马西庚. 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. Research on Optimization of Feeding Belt Quantitative Packaging Scale Based on Fuzzy Control[J]. Electrical Automation, 2015, 37(1): 24—26.
- [4] 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.
- [5] 王立新, 王迎军. 模糊系统和模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
WANG Li-xin, WANG Ying-jun. Fuzzy System and Fuzzy Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [6] 苏绍兴, 黄金梭. 模糊 PID 控制在复合纸板分切机速度控制中的应用[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 80—84.
SU Shao-xing, HUANG Jin-suo. Application of Fuzzy-PID Control in Crosscut Feeding Speed Control of the Composite Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 80—84.
- [7] 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. A Method of Controlling a Loading System Based on a Fuzzy-PID Controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166—172.
- [8] 郑炽阳, 刘晓悦. 基于模糊自适应 PID 控制的煤粉计量控制系统[J]. 河北联合大学学报, 2016, 38(2): 58—63.
ZHENG Chi-yang, LIU Xiao-yue. Pulverized Coal Measure and Control System Based on Fuzzy Self-adaption PID[J]. Journal of Hebei United University (Natural Science Edition), 2016, 38(2): 58—63.
- [9] DZAMPO G, MUMINOVIC H N. Indoor Temperature Regulation on Small Scale Model Using Matlab-based Regulators[J]. Mipro International Convention, 2011 (5): 1718—1722.
- [10] 薛雷, 孙以泽, 李培兴, 等. 基于模糊 PID 的裤袜包装机热封切刀温度控制的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 16—20.
XUE Lei, SUN Yi-ze, LI Pei-xing, et al. Research on Temperature Control of Heat-sealing Cutting Knife of Panty-hose Packaging Machine Based on Fuzzy-PID[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 16—20.
- [11] 刘海明. 基于模糊 PID 的禽蛋抓取测控系统步进电机的研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(21): 4473—4476.
LIU Hai-ming. Study on the Step Motor for Egg-grasping Measurement and Control System Based on Fuzzy-PID[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(21): 4473—4476.
- [12] 仇成群, 刘成林, 沈发华, 等. 基于 Matlab 和模糊 PID 的汽车巡航控制系统的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 197—202.
QIU Cheng-qun, LIU Cheng-lin, SHEN Fa-hua. Design of Automobile Cruise Control System Based on MATLAB and Fuzzy-PID[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 197—202.
- [13] WU Yan-xiang, ZHANG Li, ZHANG Chao-jun, et al. The Design and Research of Quantitative Packaging System for Industry Manufactruing Based on PLC[C]// 2013 3rd International Conference on Industry, Information System and Material Engineering, IISME, 2013: 67—71.
- [14] 孟凡兴, 李丽娟, 程国清. 热合装置 PLC 温度控制系统研究与开发[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 128—133.
MENG Fan-xing, LI Li-juan, CHENG Guo-qing. Research and Development of PLC Temperature Control System of Heating-sealing Device[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 128—133.
- [15] ZHANG Fang-fen, ZHOU Bao-feng. Fuzzy-PID Control of Riser Recoil Process Based on S7-300 PLC[C]// IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC, 2014: 1—4.