

文章编号: 1005-5630(2024)02-0028-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202302070014

Smith 预估模糊 PID 控制算法及其在粉末定量称重中的应用

陈奇¹, 袁旭军², 张荣福¹, 郑阳¹

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 上海科源电子科技有限公司, 上海 200612)

摘要: 针对上海科源电子科技有限公司研发的定量称重系统(由高精度抖粉装置与万分之一天平组成), 在工作中因粉末密度、粉末流动性、颗粒大小、湿度、天平延时等因素造成的非线性和滞后等问题, 采用 Smith 预估模糊 PID 控制器优化控制方法。首先通过理论分析, 得出系统的传递函数, 再构建 Smith 预估的模糊 PID 控制器, 以适应系统的非线性、滞后等特性, 最后将此算法代入 MATLAB 进行仿真并于实际系统中进行 1 g 定量抖粉实验。Smith 预估模糊 PID 控制算法和传统 PID 算法的标准差分别为 0.0020 和 0.0042, 表明 Smith 预估模糊 PID 控制算法在实际环境中稳定性更好, 能有效减小系统的称重误差。

关键词: 粉末定量称重; Smith 预估器; 模糊 PID 控制器; 自动化

中图分类号: TP 13 **文献标志码:** A

Smith predictive fuzzy PID control algorithm and its application in powder quantitative weighing

CHEN Qi¹, YUAN Xujun², ZHANG Rongfu¹, ZHENG Yang¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Cohere Electronic Technology Co., Ltd., Shanghai 200612, China)

Abstract: Aiming at the quantitative weighing system developed by Shanghai Cohere Electronic Technology Co., Ltd. (consisting of a high-precision powder shaking device and a 1/10000 balance), which has nonlinearity and time delay problems due to factors such as powder density, powder fluidity, particle size, humidity, and balance delay during operation, the Smith predictive fuzzy PID controller is used to optimize the control method. Firstly, based on theoretical analysis, the transfer function of the system is obtained, and then a Smith predictive fuzzy PID controller is constructed to adapt to the nonlinearity, time delay, and other characteristics of the system. Finally, this algorithm is substituted into MATLAB to perform simulation, and a 1 g quantitative shaking experiment is carried out in the system. The standard deviation of the Smith predictive fuzzy PID

收稿日期: 2023-02-07

第一作者: 陈奇(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为自动化系统设计。E-mail: 375510947@qq.com

通信作者: 张荣福(1971—), 男, 教授, 研究方向为光学仪器、图像处理与应用。E-mail: zrf@usst.edu.cn

control algorithm and the traditional PID algorithm is 0.0020 and 0.0042, respectively. In conclusion, the Smith predictive fuzzy PID control algorithm has better stability in practical environments and can effectively reduce the weighing error of the system.

Keywords: quantitative weighing of powder; Smith predictor; fuzzy PID controller; automation

引言

粉末定量称重技术^[1]在食品、医药、贵金属等行业有着迫切的需求。在食品行业,水稻、小麦、大豆等食品都需研磨成粉,称重分样,加液定容后进行大量的检测项目如胶稠度、直链淀粉、污染指数等,才可认定是否为可食用产品。在医药行业,如胶囊、泡罩型粉雾剂的生产,需要对大量药物粉末进行称重分样混合^[2],确保每份药品的剂量均一。粉状药品的质量检测、成分鉴定等方面也需要此定量称重技术。在贵金属行业,如金属粉末注射成形(MIM)技术,是传统的粉末冶金技术与热塑性塑料注射成形技术相结合而产生的一种近净成形技术,配比合适的金属粉末是此技术的第一步。MIM技术的金属粉末一般通过羟基法和雾化法制备^[3],颗粒度不均匀难以直接使用,需要经过称重分样筛选才可应用于注射器中。人工定量称重费时费力,不能满足大批量分样需求,因此,需开发定量称重系统。

粉末定量称重技术现存的3个关键问题是:1)称重的精度;2)称重的速度^[4];3)粉末间的污染。在动态称重的过程中存在粉末密度、粉末流动性、颗粒大小、湿度等因素的影响,导致加快称重速度时,存在粉末冲击与空中飞料等因素影响称重精度,而提高称重精度时,整体的称重速度又将受到影响。为解决这些问题,国内外学者已做了不少研究。常波等^[5]针对定量包装中的问题提出模糊控制理论的控制方案,并对系统进行了仿真研究。任少伟等^[6]针对包装时的非线性与时不变特性,提出基于可编程逻辑控制器(PLC)的模糊PID控制策略,以提高系统的鲁棒性与控制精度。耿涛等^[7]提出了基于模糊推理的专家自整定PID控制器,但对工程人员存在一定的依赖性。

本文研究对象为上海科源电子科技有限公司所研制的高精度抖粉装置,该装置中的抖出结构能有效解决粉末污染问题。该装置与恒宇FA2000万分之一天平相结合,组成米粉粉末定量称重系统。系统工作时,分为两个阶段:第一阶段被控电机短间隔全速抖粉直至目标值的80%;第二阶段被控电机长间隔慢速抖粉渐渐逼近目标值。因存在粉末密度、粉末流动性、颗粒大小、湿度等客观因素的影响,第二阶段完全相同的两次抖动出粉量也存在偏差。基于此问题,本文先对抖粉装置出粉量建模,结合天平显示迟滞的特性,分析影响其出粉量的主要因素,并将这些因素作为被控对象,采用基于Smith预估的模糊PID控制方法,实现对PID控制参数的在线调整,提高非线性、时滞定量称重系统的称重精度,完成第二阶段抖粉算法设计。

1 被控对象系统模型建立

如图1所示为高精度抖粉装置。该装置工作时,由上位机通过串口向电机发送控制指令,指

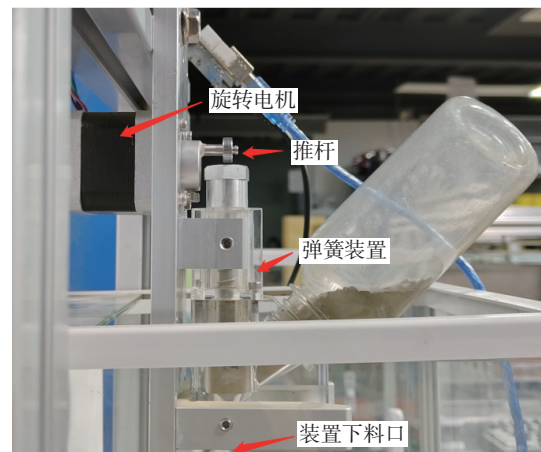


图1 高精度抖粉装置

Fig. 1 High-precision powder shaking device

令包括电机旋转的行程距离、最大速度、旋转加速度等信息。电机接收到指令后做出相应动作并带动推杆向下运动,运动过程中装置末端向下探出使粉末由装置下料口自然抖出。电机完成动作后归于原位,整体装置在弹簧作用下也归于原位,装置下料口收回,停止抖粉。

被控对象系统由两部分组成:1)高精度抖粉装置;2)万分之一天平。高精度抖粉装置负责控制抖出的米粉粉末量,万分之一天平负责抖出粉末称重和显示,并反馈给控制端。先对抖粉装置运动出粉量模型进行数学推导,再在此模型基础上结合称重系统滞后修正,最后通过影响因素分析与系统辨识得出影响出粉质量的主要因素与被控对象的传递函数。

1.1 抖粉装置运动数学模型

在 $0 \sim t$ 时间间隔内粉末下落总质量 $W(t)$ 与运动时粉末下落流量率 $Q(t)$ 的数学模型为

$$W(t) = \int_0^t Q(t) dt \quad (1)$$

式中 $Q(t)$ 为粉末下落流量率, g/s。

对式(1)进行拉氏变换可得

$$sW(s) = \rho Q(s) \quad (2)$$

式中 ρ 为粉末密度

假设动态抖粉模型为一阶线性,则粉末抖出的运动方程为

$$a \frac{d}{dt} Q(t) + bQ(t) = ku(t) \quad (3)$$

则由式(3)可得系统的传递函数为

$$G(s) = Q(t)/U(s) = k/(as+b) \quad (4)$$

式中 a, b, k 均为对象参数。

在抖粉的过程中必然存在机械振动等噪声因素的干扰,假设 $Q(s)$ 为存在噪声条件下的粉末流量, $\varphi(s)$ 为噪声,则初始值为零的拉氏变换为

$$Q(s) = (k/as+b)u(s) + \varphi(s) \quad (5)$$

1.2 称重系统模型

抖粉装置抖出粉末后,万分之一天平负责对粉末进行称量并在系统中记录反馈。万分之一天

平本身具有高精度、高准确性等性质,其内部的质量判断、质量校准较为复杂,并具有非线性、惯性、滞后等特点。面对这些特点,单纯采用机理建模法构建的数学模型不仅拟合度有限,而且面临数学模型可能无解或者多解的问题。考虑到系统中高精度天平仅作用于抖粉装置的质量显示,且在实验过程中,不同的砝码在秤上稳定时间大致相同,可认为是一个大滞后模块,所以在上文传递函数中加纯滞后环节来近似替代,则抖粉装置与天平组成的称重系统的传递函数为

$$Q'(s) = (ke^{-\tau s}/as+b)u(s) + \varphi(s) \quad (6)$$

式中 $\varphi(s)$ 为所有噪声的总和。

1.3 影响因素分析与系统辨识

通过上文模型分析,将抖粉装置抖出粉末的质量转化为与粉末下落流量率相关的系统模型,客观上与粉末密度、粉末流动性、颗粒大小、湿度等因素有关。本文研究米粉粉末定量称重,暂时忽略粉末性质影响。粉末下降流量率可分解为一定时间间隔内抖出粉末质量。由单次抖粉时间间隔决定此时间内可抖粉的次数;由单次抖粉电机运动决定抖出粉末质量。为方便控制,将单次抖粉时间间隔设为定值,这样在一定时间内抖粉运动次数为定值,粉末下降流量率仅与在此间隔内单次抖粉运动有关。单次抖粉运动控制端与旋转电机最大速度、加速度、旋转电机运动的行程距离等因素有关,对这些因素采用控制变量的研究方法寻找其主要影响因素。

控制同种米粉粉末且最大电机旋转速度为 60 r/min、加速度为定值,改变电机单次抖粉时旋转电机运动的行程距离,使系统单次抖粉,记录抖出粉末质量,实验数据如表 1 所示。

由表可知,行程距离为 1.2 cm 时,单次抖粉运动下落粉末质量均值为 0.0013 g;行程距离为 1.6 cm 时,单次抖粉运动下落粉末质量均值为 0.0155 g;行程距离为 2 cm 时,单次抖粉运动下落粉末质量均值为 0.0215 g。无论行程距离为多少,重复抖粉质量都存在较大的随机误差。

控制同种米粉粉末且抖动时旋转电机运动的加速度固定,行程距离为定值 2 cm,改变旋转电机最大速度,使系统单次抖粉,记录抖出粉末质量,均值数据如表 2 所示。

表 1 不同行程距离抖出粉末质量
Tab. 1 Powder weight at different travel distances
after shaking

行程/cm	质量/g	行程/cm	质量/g	行程/cm	质量/g
1.2	0.0011	1.6	0.0138	2	0.0238
1.2	0.0022	1.6	0.0156	2	0.0209
1.2	0.0019	1.6	0.0151	2	0.0146
1.2	0.0012	1.6	0.0138	2	0.0286
1.2	0.0009	1.6	0.0112	2	0.0268
1.2	0.0012	1.6	0.0169	2	0.0301
1.2	0.0019	1.6	0.0165	2	0.0110
1.2	0.0011	1.6	0.0167	2	0.0287
1.2	0.0013	1.6	0.0181	2	0.0133
1.2	0.0002	1.6	0.0177	2	0.0174

由表 2 可知, 即使采用不同的旋转电机最大速度, 相同行程下得到的质量结果虽上下波动但均趋于 0.02 g 左右, 说明其并非影响抖出粉末质量的主要因素。

由两次实验可知, 虽相同行程下单次抖粉运动抖出粉末质量存在随机误差, 但抖粉电机运动行程为影响多次运动下落粉末质量的主要因素, 即相同单次抖粉时间间隔下, 影响粉末下落流量率的主要因素。所以本文将抖粉电机运动不同的行程距离作为主要研究对象, 研究抖粉粉末质量。将表 1 实验数据导入 MATLAB 辨识系统, 利用递推最小二乘法进行系统辨识^[8]。最小二乘法表达式为

$$\mathbf{X}_m = \mathbf{X}_{m-1} + \mathbf{H}_m(\mathbf{Y}_m - \alpha_m \mathbf{X}_{m-1}) \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_m = \frac{\mathbf{P}_m \alpha_m}{1 + \alpha_m^T \mathbf{P}_m \alpha_m} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{P}_{m-1} - \mathbf{H}_m \mathbf{P}_{m-1} \alpha_m \quad (9)$$

式中: \mathbf{X}_m 为第 m 次参数辨识矢量; \mathbf{H}_m 、 \mathbf{P}_m

为辅助递推矩阵。通过系统辨识可知为一阶滞后模型, 从而得到修正后传递函数为

$$Q'(s) = \frac{0.2754e^{-s}}{s + 2.408} + \varphi(s) \quad (10)$$

式中 $\varphi(s)$ 为所有噪声的总和。

2 基于 Smith 预估补偿的模糊 PID 控制系统

在本设计中, 由“Smith 预估补偿器”+“模糊 PID 控制器”构成控制系统。Smith 预估补偿器可以根据输出量偏离控制量的程度实现对系统滞后部分的补偿, 克服纯滞后环节带来的不利影响, 从而改善系统的控制品质。模糊控制通过推理不同实时状态下 PID 参数变化量以调整输入参数, 使系统更具有实时性, 从而达到改善系统动态性能的目的^[9]。

2.1 Smith 预估补偿

史密斯(O. J. M. Smith)在 1957 年提出一种针对纯滞后系统的预估补偿方案。他在 PID 反馈控制的基础上, 引入了一个预估补偿环节使闭环特征方程不含纯滞后项。其特点是预先估计出系统在扰动下的动态特性, 然后由预估器进行补偿, 力图使被延迟了的控制作用超前反应到调节器, 使调节器提前动作, 从而抵消滞后特性对系统的影响^[10]。

带纯滞后的单回路控制系统的闭环传递函数为

$$\phi(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}} \quad (11)$$

为了消除控制系统中的滞后部分, 需要消除分母中 $e^{-\tau s}$ 部分, 相当于将 $G_0(s)$ 作为对象, 使控制信号提前, 从而减少滞后影响。Smith 预估补偿系统的控制框图如图 2 所示。

表 2 不同最大速度抖出粉末质量
Tab. 2 Powder weight at different maximum speeds after shaking

最大速度/(r/min)	单次运动抖出粉末质量/g										平均值/g
40	0.0240	0.0200	0.0221	0.0165	0.0173	0.0169	0.0181	0.0189	0.0206	0.0200	0.0194
50	0.0182	0.0235	0.0198	0.0147	0.0206	0.0169	0.0199	0.0215	0.0166	0.0172	0.0189
60	0.0182	0.0235	0.0218	0.0207	0.0206	0.0169	0.0199	0.0215	0.0236	0.0212	0.0208

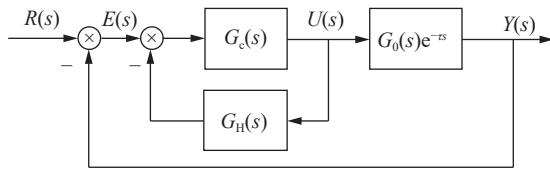


图 2 Smith 预估补偿系统控制框图

Fig. 2 Control block diagram of Smith predictive compensation system

如图 2 所示，在控制系统中引入预估补偿器 $G_H(s)$ ，令 $G_H(s) = G_m(s)(1 - e^{-\tau_m s})$ ，此时系统的传递函数为

$$\phi(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)[G_0(s)e^{-\tau s} - G_m(s)e^{-\tau_m s}]} e^{-\tau s} \quad (12)$$

由式 (12) 可以看出，在模型精确的情况下 $G_0(s) = G_m(s)$ ， $\tau = \tau_m$ ，分母中的滞后环节可与预估部分相抵消，此时的闭环传递函数为

$$\phi(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)}{1 + G_c(s)G_0(s)} e^{-\tau s} \quad (13)$$

传递函数中滞后环节的不良影响得以消除。但当系统数学模型因各种因素发生变化时，补偿器与被控对象模型不能完全匹配，将影响控制精度。

2.2 模糊 PID 控制系统

模糊 PID 控制系统在一定程度上降低了对

数学模型的精度要求^[11]，通过将系统的控制量离散化，并与有着良好静态效果的 PID 控制结合，能很好地弥补各自在控制中的不足。模糊控制系统利用模糊控制器代替传统系统中的模拟式控制器^[12]，根据模糊规则在线对 PID 参数进行修正^[13]，保证在不同情况下，即使数学模型存在偏差，也能快速准确地进行控制。整体控制器结构如图 3 所示。

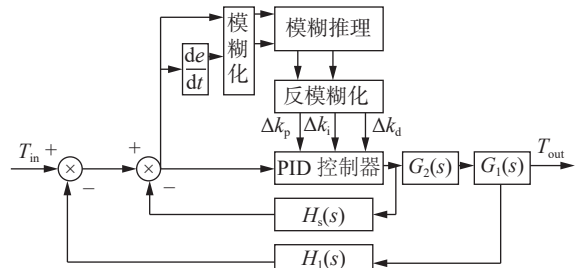


图 3 Smith 预估模糊 PID 控制器

Fig. 3 Smith predictive fuzzy PID controller

系统采用二输入三输出的控制结构，以称重误差 e 与误差的变化率 e_c 为输入，以 3 个 PID 参数的变化量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为输出，设定输入与输出的模糊子集均为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，表示 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}，根据实验中的 PID 调节经验，设计模糊控制规则^[14]，将所有的 49 条控制规则整理为模糊控制表，如表 3 所示。

表 3 模糊控制表

Tab. 3 Fuzzy control table

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

根据模糊控制表，可对 PID 控制中的 K_P 、 K_I 、 K_D 进行动态整定，设 K'_P 、 K'_I 、 K'_D 为常规整定方法得到的整定参数，则在模糊 PID 控制器中，三者为

$$\begin{cases} K_P = K'_P + \Delta k_p \\ K_I = K'_I + \Delta k_i \\ K_D = K'_D + \Delta k_d \end{cases} \quad (14)$$

3 系统仿真

3.1 仿真模型构建

根据上述理论分析, 在 MATLAB/Simulink

仿真环境中构建仿真模型。仿真的目的是构建出传统 PID 控制算法、模糊 PID 控制算法、Smith 预估模糊 PID 控制算法的控制模型, 并对其控制效果进行比较分析^[15]。

传统 PID 控制器中, $K'_P=3$, $K'_I=4$, $K'_D=0.5$, 部分仿真模型如图 4 所示。

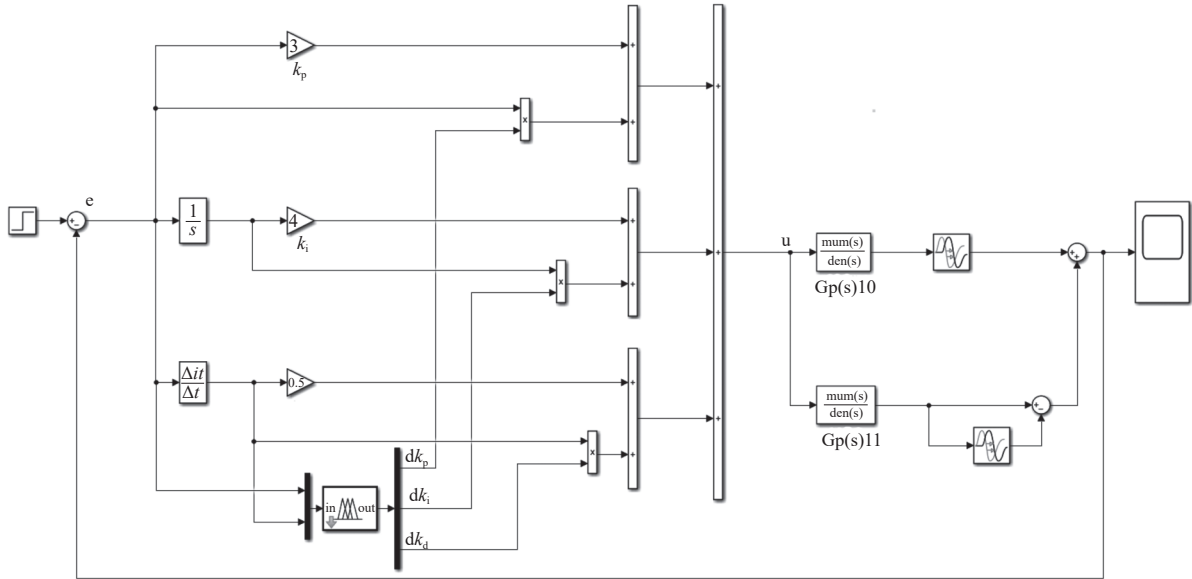


图 4 MATLAB 仿真模型

Fig. 4 MATLAB simulation model

3.2 给定输入下仿真结果对比

根据上文建立的传统 PID、模糊 PID、Smith 预估模糊 PID 3 种控制策略下的仿真模型, 在 $1T$ 时刻输入幅值为 2 的阶跃信号, 观察 3 种控制方法的仿真结果, 如图 5 所示。

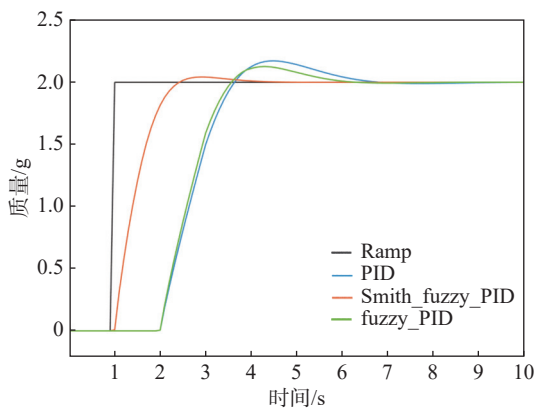


图 5 给定输入下仿真结果

Fig. 5 Simulation results for given input

图 5 中红色部分为 Smith 预估模糊 PID 控制, 绿色部分为模糊 PID 控制, 蓝色部分为传统 PID 控制, 黑色部分为原始的输入信号。本次输入信号终值为 2、响应时间为 $1T$ 的阶跃信号。不难看出 Smith 预估模糊 PID 控制算法稳定时间为 $4.5T$, 超调量为 4.2%; 模糊 PID 控制算法稳定时间为 $6.5T$, 超调量为 12.6%; 传统 PID 控制算法稳定时间为 $7T$, 超调量 16.2%。对比 3 种控制算法可得, Smith 预估模糊 PID 控制算法达到稳态时间短, 超调量小, 具有更好的静态特性。

3.3 添加扰动后仿真结果对比

粉末称重在实际过程中存在粉末密度、流动性、颗粒大小、湿度等因素的影响, 故整个系统需要有较好的抗干扰能力。本次实验在前文初始输入相同的情况下, 在 $10T$ 时加入 1 个幅值为 1 的输入信号与噪声功率为 10^{-4} 的高斯白噪声, 仿真结果如图 6 所示。

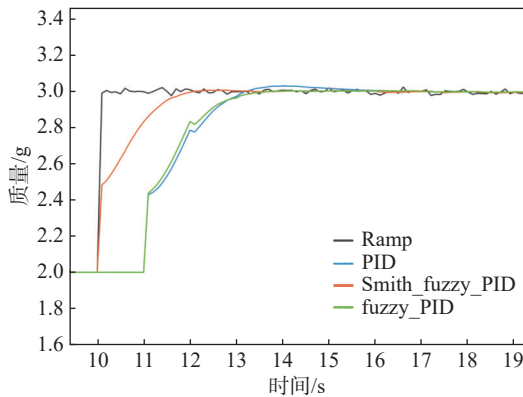


图 6 添加扰动后仿真结果

Fig. 6 Simulation results with added disturbance

不难看出 Smith 预估模糊 PID 控制算法在 13.4T 后重新回到稳态，超调量几乎为 0；模糊 PID 控制算法在 14T 后重新回到稳态；传统

PID 控制算法在 16T 后重新回到稳态。面对干扰，Smith 预估模糊 PID 控制算法较其他算法有着更短的恢复时间、更小的超调量和更好的抗干扰能力。

4 实 验

完成系统仿真与算法对比后，基于粉末定量称重系统搭建实验平台。抖粉装置部分由上位机发送 Gcode 控制电机的最大旋转速度、加速度与行程，天平示数由恒宇 FA2000 万分之一天平通过 232 总线回传示数。软件部分由 LabVIEW 搭建与仿真算法类似的 Smith 预估模糊 PID 控制器，部分模糊 PID 参数设置框图如图 7 所示。

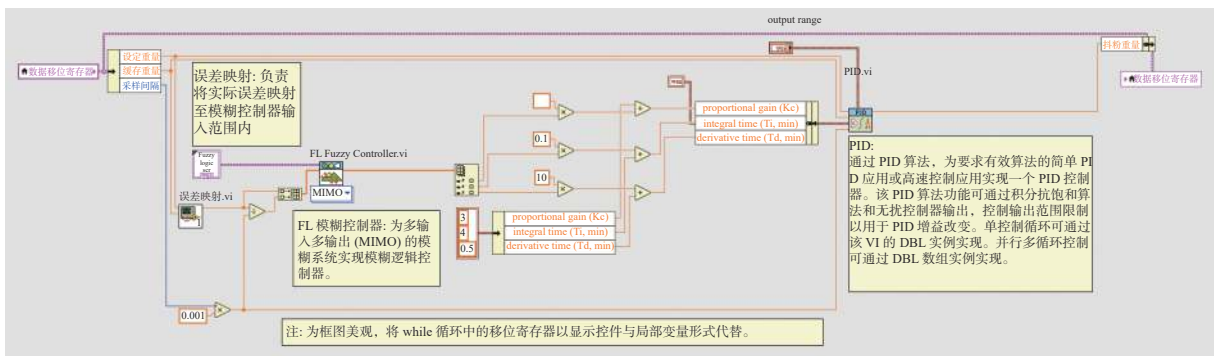


图 7 模糊 PID 参数设置程序框图

Fig. 7 Block diagram of the fuzzy PID parameter setting program

在此平台基础上，分别用传统 PID 控制器与 Smith 预估模糊 PID 控制器进行 100 次 1g 定量称重实验，传统 PID 定量称重数据如图 8 所示。数据统计如表 4 所示。

表 4 传统 PID 定量称重数据统计表

Tab. 4 Statistics of the conventional PID quantitative weighing

最大值/g	最小值/g	平均值/g	中间值/g	标准差
1.0115	0.9910	1.0012	1.0008	0.0042

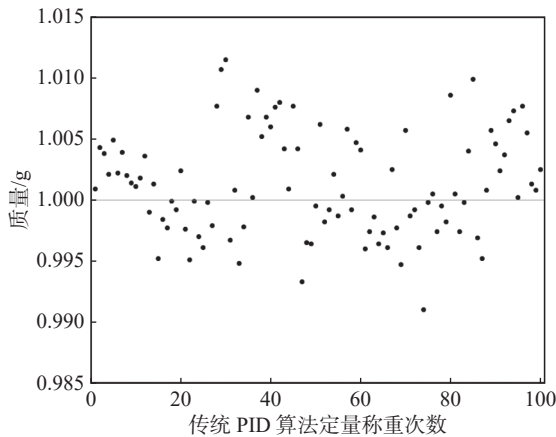


图 8 传统 PID 定量称重数据

Fig. 8 Data with conventional PID quantitative weighing

Smith 预估模糊 PID 定量称重数据如图 9 所示。数据统计如表 5 所示。

由上述数据可知，传统 PID 的 1g 定量称重质量平均值为 1.0012 g，最大质量为 1.0115 g，最小质量为 0.9910 g，标准差为 0.0042；Smith 预估模糊 PID 的 1g 定量称重质量平均值为 1.0013 g，最大值为 1.0059 g，最小值为 0.9973 g，标准差为 0.0020。虽然两种算法定量称重平均值与中间值相近，但因抖粉装置单次抖粉存在随机误差，传统 PID 称重无法在线调整 PID 参数，易产生超重或粉末不足的情况，而 Smith 预估模糊 PID 控

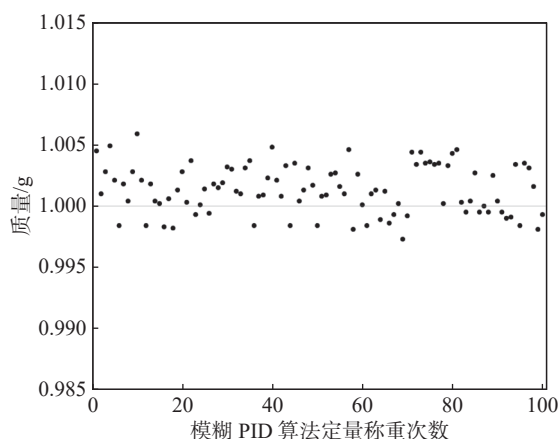


图9 Smith 预估模糊PID 定量称重数据

Fig. 9 Data using Smith fuzzy PID quantitative weighing

表5 Smith 预估模糊PID 定量称重数据统计表
Tab. 5 Statistics using Smith fuzzy PID quantitative weighing

最大值/g	最小值/g	平均值/g	中间值/g	标准差
1.0059	0.9973	1.0013	1.0013	0.0020

制算法在实际环境中均一性更好。

5 结论

本文主要工作是基于高精度抖粉装置与万分之一天平组成的米粉粉末定量称重系统, 推导验证其传递函数, 研究了 Smith 预估模糊 PID 控制算法并对其进行了仿真, 最后搭建实验平台进行 1 g 定量称重测试。先分别在给定输入值和添加扰动值两种工况下, 仿真研究了传统 PID、模糊 PID 和 Smith 预估模糊 PID 3 种控制策略。较其他两种算法, Smith 预估模糊 PID 控制策略在静态特性与面对干扰时的性能方面优于传统 PID 和模糊 PID。最后进行各 100 次的 1 g 定量称重实验, Smith 预估模糊 PID 控制算法单次抖粉平均值为 1.0013 g, 标准差为 0.0020, 传统 PID 算法单次抖粉平均值为 1.0013 g, 标准差为 0.0042, 这表明 Smith 预估模糊 PID 控制算法在实际环境中均一性更好, 能有效减小系统的称重误差。

参考文献:

- [1] 喻先锋, 曹金林, 姚重阳. 动态定量称重技术控制策略和算法 [J]. 轻工机械, 2013, 31(1): 55 – 59.
- [2] 薛忠, 徐冰, 张志强, 等. 药物粉末混合过程在线监控技术研究进展 [J]. 中国药学杂志, 2016, 51(2): 91 – 95.
- [3] 侯成龙, 郭俊卿, 陈拂晓, 等. 金属粉末注射成形技术及其数值模拟 [J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(1): 72 – 79.
- [4] 李鹏. 动态定量称重系统的研究与实现 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [5] 常波, 阎有运, 梁硕. 基于模糊算法的配料称重控制策略研究与应用 [J]. 电子测试, 2009(5): 1 – 5, 43.
- [6] 任少伟, 杨传民, 孟祥飞. 基于 PLC 的全自动给袋式包装机称量控制系统研究 [J]. 包装工程, 2019, 40(3): 162 – 168.
- [7] 耿涛, 赵金, 刘洋. 基于模糊推理的专家自整定 PID 控制器 [J]. 华中科技大学(自然科学版), 2010, 38(6): 4 – 7.
- [8] 丰会萍, 卫前伟, 胡亚南, 等. 基于粒子群模糊 PID 的茶叶包装机定量称重控制 [J]. 制造业自动化, 2020, 42(7): 62 – 67.
- [9] 张俊雄. 基于预估模糊 PID 的空调系统控制研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [10] 栾军山, 陈华. Smith-模糊 PID 在过程控制中的应用 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2010, 24(7): 106 – 109.
- [11] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程 [M]. 王迎军, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [12] ZHOU Y K. Research on self-tracking car based on fuzzy-PID control algorithm [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2170: 012012.
- [13] AFTAB A, LUAN X C. A fuzzy-PID series feedback self-tuned adaptive control of reactor power using nonlinear multipoint kinetic model under reference tracking and disturbance rejection [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 166: 108696.
- [14] 何茜, 韩军, 陈文建. 近室温样品加热炉温度的模糊 PID 控制研究 [J]. 光学仪器, 2013, 35(2): 74 – 78.
- [15] 吴仕平, 陈军, 蔡洁, 等. 基于模糊 PID 的半导体激光器工作温度控制 [J]. 光学仪器, 2009, 31(6): 30 – 34.

(编辑: 张磊)