

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209618

改进指数趋近律的炒药机模糊滑模温度控制方法^{*}

赵龙 杜钦君 庞浩 冯晗 罗永刚

(山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255022)

摘要: 为提高炒药机温度控制系统控制精度和响应速度,提出了一种改进的模糊滑模控制方法。改进内容包括滑模面和趋近律的设计。设计了一种带有指数函数的滑模面,当误差较大时,控制加热系统保持最大功率输出,缩短了系统调节时间;为抑制固定切换增益引起的抖振现象,设计了带有幂-指数切换增益的指数趋近律,利用模糊控制器调节幂-指数函数的权重,当系统误差较小时,利用幂函数快速衰减的优点,有效抑制了抖振。MATLAB 仿真结果表明:与传统模糊滑模控制相比,本文控制方法的调节时间缩短 54.94%;对抖振现象具有明显的抑制作用。工程应用效果表明:采用本控制方法的炒药机在稳定工作时,温度波动范围为 $\pm 2.12\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合中药炒制工艺要求。

关键词: 炒药机;温度控制;滑模控制;抖振;新型趋近律

中图分类号: TP273;TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Fuzzy sliding mode temperature control method of herbal medicine roaster based on improved exponential reaching law

Zhao Long Du Qinjun Pang Hao Feng Han Luo Yonggang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255022, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy and response speed of the temperature control system of the herbal medicine roaster, an improved fuzzy sliding mode control method is proposed. The improvements include the design of sliding mode surface and reaching law. A sliding mode surface with exponential function is designed. When the error is large, the control heating system maintains the maximum power output and shortens the system adjustment time; In order to suppress the chattering phenomenon caused by fixed switching gain, an exponential reaching law with switching gain of power exponential function is designed. The weight of power exponential function is adjusted by fuzzy controller. When the system error is small, the chattering is effectively suppressed by using the advantage of rapid attenuation of power function. MABLAB/simulation results show that compared with the traditional fuzzy sliding mode control, the regulation time of this control strategy is reduced by 54.94%; It has obvious inhibitory effect on buffeting. The engineering application results show that when the herbal medicine roaster with this control method works stably, the temperature fluctuation range is $\pm 2.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, which meets the requirements of traditional Chinese medicine frying process.

Keywords: herbal medicine roaster; temperature control; sliding model control; chattering; new reaching rate

0 引言

中药炒制前后对其药用性有着重要的影响,在中药炒制的过程中,以武火炒制($170\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)为例,温度大于或小于此范围都将对中药最后的成品质量产生不可逆的影响。我国中药炒制大多以手工炒制为主,效率慢,炒制温度的波动范围大。近年来,用于中药炒制领域的电磁炒药机逐渐发展起来。电磁炒药机的温度控制系统具有大惯性、

大滞后等特点,影响了炒药机温度控制的精度和响应速度,如何提高温度控制精度和响应速度是炒药机研究的重点。目前工业中的温度控制系统大多采用模糊 PID 控制,由于积分环节的存在,超调现象不可避免,无法满足中药炒制过程中对控制精度的要求^[1-2]。

国内外学者对 PID 控制方法进行改进,用于温控制系统等方面,改善了系统在模型匹配和模型不匹配条件下的控制性能^[3-5]。冯旭刚等^[6]提出了一种模糊自适应滑模控

收稿日期:2022-04-14

^{*} 基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1707104, 2018YFC1707103)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MF096)资助

制策略;邓丽等^[7]设计了基于辅助模型递推最小二乘的广义预测算法的电加热炉温度控制系统。滑模控制具有较强的鲁棒性,被广泛应用于制导等精确控制^[8-9],但其抖振现象一直制约着滑模控制的发展。2016 年 IEEE 信息与自动化国际会议提出了利用分数阶微积分函数抑制滑模控制抖振的方法^[10]。郑美茹^[11]利用分数阶符号函数软过渡的特性降低了抖振现象。章家岩等^[12]通过模糊控制对切换增益进行估计,减弱了抖振现象。郑丽等^[13]提出自适应超扭曲滑模控制器,虽然有效地减小了抖振,但是由于炒药机温度系统大滞后特性,会使抖振现象被不断累加,无法满足炒药机精度的要求。

本文提出一种改进模糊滑模控制(improved fuzzy sliding mode control, IFSMC)方法,用于炒药机温度控制系统。利用指数函数对滑模面进行改进,当加热系统温度

误差较大时,系统以最大功率进行加热。为抑制固定切换增益带来的抖振现象,对指数趋近律进行改进,利用幂函数在零点附近的快速衰减性,减小系统运动点在滑模面附近的切换增益,减弱抖振,提高温度控制的精度。

1 炒药机数学模型

电磁炒药机的机械结构如图 1 所示,在震动喂料器的作用下,待炒制的中药被不断地送至传送带上,经由履带上料机将其送至电磁连续炒药机的滚筒中;此时,加热器开始工作,在高频交流电输入的作用下,电能转化为热能,为滚筒内部的中药加热;与此同时,在驱动电机的带动下,滚筒开始旋转,在滚筒内部螺纹的推动下,将被加热的中药推送至出口,最后落入滚筒冷却机中。而后再经其他工序,完成中药的自动化炒制。

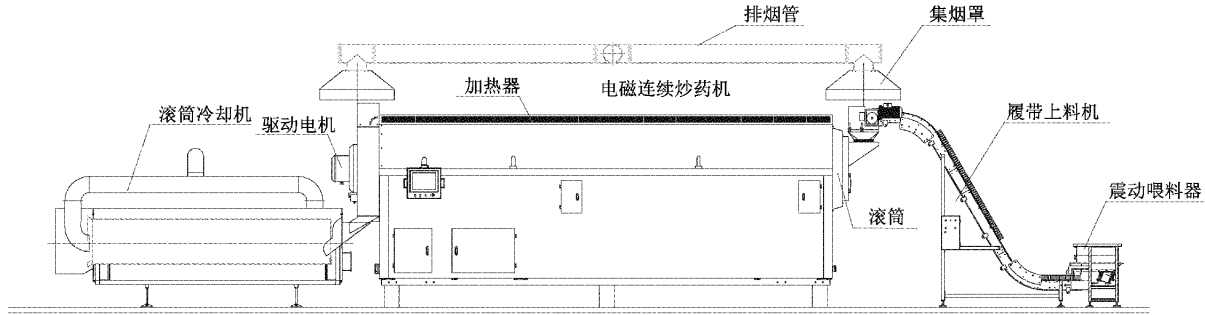


图 1 炒药机机械结构

滚筒加热结构采用电磁感应加热。加热线圈缠绕在滚筒外侧,给加热线圈通入交流电,会在机筒内部产生交变磁场;由于滚筒是金属结构,交变磁场会在滚筒上产生感应电流;再根据电流的热效应,产生热能,以此加热机筒内部的中药原料。物料升温过程分为线圈加热和滚筒散热等过程,炒药机温度系统滞后性较大,经计算,炒药机加热系统的传递函数可用式(1)进行描述:

$$G(s) = \frac{K_g}{\tau_1 s + 1} \exp(-\tau_0 s) \quad (1)$$

式中: K_g, τ_1 为增益系数和常数,与炒药机尺寸参数、材质等有关; $\exp(-\tau_0 s)$ 为延迟环节, τ_0 为延迟时间。

采用大惯性系数的 Pade 对 $e^{-\tau_0 s}$ 近似化简,化简后系统模型可表示为^[14 15]:

$$G(s) = \frac{T(s)}{P(s)} = \frac{K_g}{\tau_1 s + 1} \frac{1}{\tau_2 s + 1} \quad (2)$$

式中: T 为温度; P 为加热功率。

炒药机温度系统的滞后性较大,若使用传统 PID 控制,在积分环节的作用下,将会产生较大的超调量,控制效果较差。本文采用滑模变结构控制,通过设计滑模面,使系统运动点沿着滑模面运动,可以缩短温度调节时间,降低超调量。为方便滑模控制器的设计,将式(2)改写成时域下微分方程的形式:

$$\zeta_1 \dot{T} + \zeta_2 \ddot{T} + T = K_g P \quad (3)$$

式中: $\zeta_1 = \tau_1 \tau_2; \zeta_2 = \tau_1 + \tau_2$ 。

2 炒药机温度控制器设计

电磁炒药机的温度控制系统结构如框图 2 所示。其中,滑模控制器的输入为温度误差和误差变化率,输出为加热线圈的功率;模糊控制器的输入为温度误差和误差变化率,输出为滑模控制器的切换增益权重系数 γ 。

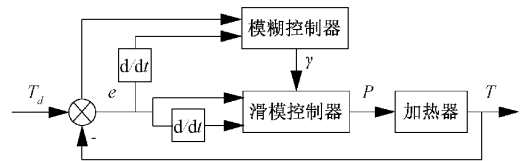


图 2 温度控制系统结构图

滑模控制中,系统运动点在沿着滑模面进行运动的过程中,运动点会不断穿越滑模面,直至运动到系统平衡点。本文利用 Sigmoid 函数对滑模面进行改进,结合炒药机加热功率,设计了新型曲线滑模面,缩短调节时间。系统运动点穿越滑模面的过程会带来抖振现象,穿越滑模面时的速度称为切换增益,切换增益是影响抖振的主要因素。本文设计了新型趋近律,通过模糊控制输出的权重系数 γ ,调节趋近律中的切换增益,以此抑制抖振现象,改善炒药机温度控制效果。

2.1 滑模控制器的设计

传统滑模函数一般为微分滑模函数和积分滑模函数,本文提出一种指数微分滑模函数 s_j :

$$s_j = \dot{e} - \alpha \left(\frac{1}{1 + \exp(e)} - 0.5 \right) \quad (4)$$

式中: $e = T_d - T$ 为系统温度误差, T_d 为给定温度; α 为系数,取决于加热器最大功率的大小。

在相平面中, $s_j = 0$ 为系统的滑模面,当系统运动到滑模面附近时,在滑模面附近做滑动运动,直至趋近于平衡点。式(4)中,令 $s_j = 0$ 可得:

$$\dot{e} = \alpha \left(\frac{1}{1 + \exp(e)} - 0.5 \right) \quad (5)$$

由热力学定律可知,系统温度误差变化率与加热功率成比例关系,即 $\dot{e} = \delta P$ (δ 为比例系数),图3所示为式(5)滑模面。考虑生产实际,最大加热功率为定值,在相平面中,系统运动到滑模面附近,当误差较大时,系统会沿滑模面的渐近线运动,控制器的输出几乎不变,以最大功率 α 加热,缩短调节时间;当误差较小时,控制器的输出逐渐减小,以变功率加热,减小超调。

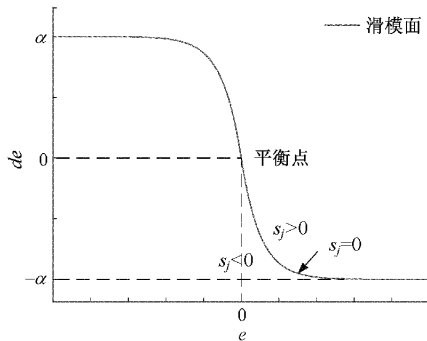


图3 滑模面示意图

下面将对本文设计的滑模面的稳定性进行证明。

证明

对式(5)的微分方程进行求解,可得:

$$e = \log \left(\frac{e^{\frac{C-t}{2}}}{2} + \frac{1}{2} e^{\frac{C-t}{2}-\frac{t}{4}} \left(e^{\frac{C-t}{2}} + 4 \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right), t > 0 \quad (6)$$

式中: C 为积分常数,验证过程中 $C=1$ 。

由式(6)可得,当 t 趋向于无穷时, e 的极限为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0 \quad (7)$$

由式(7)可知,系统误差可随时间的增长逐渐趋近于0,即系统滑模面 $s_j = 0$ 稳定。

证毕。

本文在传统指数趋近律 ($\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}s - ks$) 的基础上进行改进,并基于趋近律对控制函数进行求解。系统运动点运动的运动速率由趋近律决定,主要包括系统运动点从远处运动到滑模面附近和沿着滑模面进行滑动运动两个阶段的速率,分别影响炒药机温度控制的调节时间(指数项 $-\epsilon \operatorname{sgn}s$) 和控制精度(等速项 $-ks$)。滑模控制的抖振主

要来源于等速项 $-\epsilon \operatorname{sgn}s$ 中固定的切换增益 ϵ 。本文为减弱输出温度的抖振现象,提出一种含有可变幂一指数切换增益权重系数的指数趋近律:

$$\dot{s}_j = -(1-\gamma)(\exp(|e|) - 1) \operatorname{sgn}s_j - \gamma e^n \operatorname{sgn}s_j - ks_j \quad (8)$$

式中: n 为切换增益的幂函数次数, γ 为可变权重系数,且 $0 < \gamma < 1$; k 为指数趋近系数。

该趋近律在系统温度误差较大时,通过改变权重系数,令指数函数作为切换增益的主导,利用指数项的快速生长的特性提供较大的速率,使系统更快速地运动到滑模面;当误差较小时,令幂函数作为切换增益的主导,当误差接近于0时,利用幂函数快速衰减的特性,快速减小切换增益,降低抖振,提高炒药机温度控制的精度。

为求得滑模控制器的控制函数,对式(4)两端求导,可得:

$$\dot{s}_j = \dot{e} + \alpha \frac{\exp(e)}{(1 + \exp(e))^2} \quad (9)$$

将 $e = T_d - T$ 和式(3)带入式(9)可得:

$$\dot{s}_j = \dot{T}_d - \frac{1}{\zeta_1} (K_g P - \zeta_2 \dot{T} - T) + \alpha \frac{\exp(e)}{(1 + \exp(e))^2} \quad (10)$$

将式(8)带入式(10)并整理,可得滑模控制器输出的控制函数 u 为:

$$u = P = \frac{\zeta_1}{K_g} \left(\alpha \frac{\exp(e)}{(1 + \exp(e))^2} + (1-\gamma)(\exp(|e|) - 1) \operatorname{sgn}s_j + \gamma e^n \operatorname{sgn}s_j + ks_j \right) + \frac{1}{K_g} (\zeta_2 \dot{T} + T) \quad (11)$$

2.2 模糊控制器的设计

滑模控制中切换增益的权重系数依靠模糊控制调节,模糊控制器的输入为误差和误差的变化率。考虑中药炒制过程中,不同温度误差和误差变化率下,切换增益如何变化的问题,对模糊控制器进行设计,提高炒药机温度控制精度。

假定室温恒定 30°C ,以武火炒制的 $170 \pm 5^\circ\text{C}$ 为例,则输入的论域分别为 $[-20, +140]$ 和 $[-100, +100]$ 。为保证输入的绝对值较小时,能够更加精确地反映权重数值,隶属度函数的选取遵循以下原则:误差(或误差的变化率)的绝对值较大时,采用分辨率低的隶属度函数;误差(或误差的变化率)的绝对值较小时,采用分辨率较高的隶属度函数。定义输入变量的模糊子集为: A_1^i ($i=1, 2, \dots, 5$), 对应的模糊语言分别为:NB(负大)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PB(正大); A_2^i ($i=1, 2, \dots, 7$), 对应的模糊语言分别为:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。模糊输入隶属度函数曲线如图4(a)、(b)所示。模糊控制的输出权重系数 γ 的论域为 $[0, 1]$ 。定义输出变量的模糊子集为: A_3^i ($i=1, 2, \dots, 5$),

对应的模糊语言分别为:P0(零)、P1(较小)、P2(中)、P3(较大)、P4(一)。权重系数的变化应连续且等速,不应有快速突变。模糊输出隶属度函数曲线如图 4(c)所示。

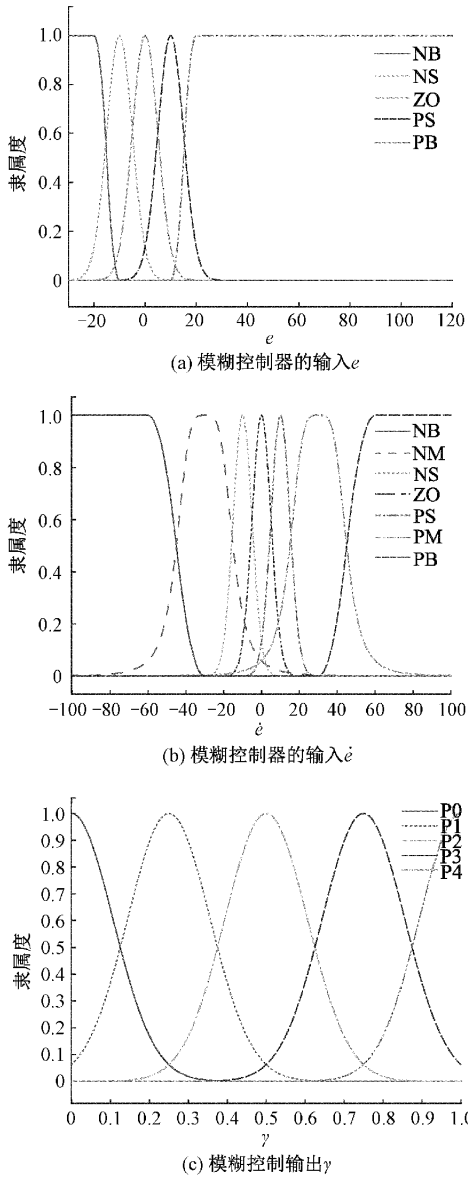


图 4 模糊控制输入、输出

模糊控制的控制规则遵循如下经验:

- 1) 如果 e 为 NB, \dot{e} 为 NB, 则减小 r ;
- 2) 如果 e 为 NB, \dot{e} 为 PB, 则增大 r ;
- 3) 如果 e 为 ZO, \dot{e} 为 ZO, 则增大 r ...

据上述规则制定如表 1 所示的模糊规则表。

采用平均值法对输出 γ 进行清晰化处理,通过计算各模糊子集隶属度的平均值,求解出模糊权重系数 γ :

$$\gamma = \frac{\sum_{m=1}^5 A_3^m}{5} \tag{12}$$

表 1 模糊控制规则表

de	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	P0	P0	P2	P2	P2
NM	P0	P1	P3	P2	P2
NS	P0	P2	P3	P3	P1
ZO	P1	P2	P4	P2	P1
PS	P1	P3	P3	P2	P0
PM	P2	P2	P3	P1	P0
PB	P2	P2	P2	P0	P0

3 稳定性分析

取 Lyapunov 函数为:

$$V(s_j) = \frac{1}{2} s_j^2 \tag{13}$$

式中: V 为 Lyapunov 算子。

对式 (13) 两边同时求导, 可得:

$$\dot{V}(s_j) = s_j \dot{s}_j \tag{14}$$

将式 (8) 带入式 (14) 可得:

$$\dot{V}(s_j) = -(1-\gamma)(\exp(|e|) - 1) s_j \operatorname{sgn} s_j - \gamma e^n s_j \operatorname{sgn} s_j - k s_j^2 \leq 0 \tag{15}$$

式 (15) 只可得证系统在 $t < \infty$ 时间内能够达到稳定状态。下面将对系统是否可在有限时间内收敛到稳定状态进行证明。

定理 1: 若 \exists 连续且正定的 $V(x); R^n \rightarrow R$ 满足:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}(x) + \eta(V(x))^r &\leq 0 \\ \dot{V}(x) < 0, x \in R^n \end{aligned} \right\} \tag{16}$$

式中: $\eta > 0, 0 < r < 1$ 。

则系统在 $T(x_0)$ 时间内收敛:

$$T(x_0) \leq \frac{V(0)^{1/r}}{\eta(1-r)} \tag{17}$$

证明

根据定理 1 改写 Lyapunov 稳定判据的第二个条件, 可使系统有限时间内达到稳定状态。令:

$$\dot{V}(s_j) \leq -\eta(V(s_j))^r \tag{18}$$

式中: 取 $r=1/2$ 。

对式 (18) 两边做积分运算得:

$$V^{1/2}(t) \leq -\frac{1}{2} \eta t + V^{1/2}(0) \tag{19}$$

即, 改进后的系统在有限时间 t_r 内达到稳定状态:

$$t_r \leq \frac{2V^{1/2}(0)}{\eta} \tag{20}$$

根据式 (17)~(20), 滑模控制器的输出函数应满足:

$$\dot{V} = s_j \dot{s}_j = -(1-\gamma)(\exp(|e|) - 1) s_j \operatorname{sgn} s_j - \gamma e^n s_j \operatorname{sgn} s_j - k s_j^2 \leq -\eta V^{1/2} = -\frac{\eta s_j}{\sqrt{2}} \tag{21}$$

式 (21)整理后表示为:

$$(1-\gamma)(\exp(|e|)-1)\text{sgns}_j + \gamma e^n \text{sgns}_j + ks_j \leq \frac{\eta}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

由式 (22)可知,对滑模控制器趋近律部分输出限幅,可满足系统在 t_s 时间内达到稳定状态。

证毕。

4 仿真及实验结果分析

根据实际设备参数,对炒药机数学模型进行对比,得到参数为: $K_g = 15, \zeta_1 = 32\ 000, \zeta_2 = 25$,最大加热功率 $P_{\max} = 35\ \text{kW}$ 。按中药武火炒制的 $170\ \text{℃} \pm 5\ \text{℃}$ 的要求,在 MATLAB/Simulink 环境下,对本设计的电磁炒药机模糊滑模温度控制系统进行仿真分析,并将输出曲线与传统模糊 PID 控制、传统模糊滑模控制进行对比。

4.1 $e-\dot{e}$ 相平面中的相轨迹

在 $e-\dot{e}$ 相平面中,系统运动点的运动轨迹如图 5 所示。

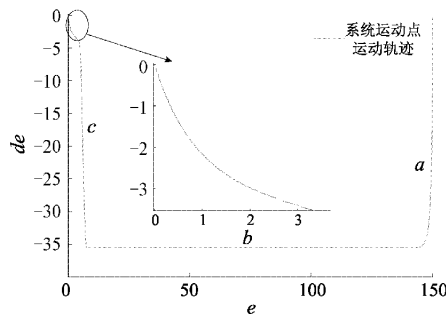


图 5 系统运动点的运动轨迹

a 区域为系统运动点运动到滑模面的过程。系统的运动点运动到滑模面后,误差较大时(如图 5 中 b 区域),在指数滑模面的作用下,沿着固定的误差变化速率趋近平衡点(恒功率加热);误差较小时(如图 5 中 c 区域),沿着逐渐减小的误差变化率趋近平衡点(变功率加热)。

4.2 温度输出

选取传统模糊滑模控制(fuzzy sliding mode control, FSMC)和模糊 PID 控制(fuzzy PID control, FPID)与本文设计的改进模糊滑模控制方法进行对比,其中模糊滑模采用积分滑模面($s_j = 15e + \dot{e}$)和指数趋近律($\dot{s}_j = -\epsilon \text{sgns} - 20s$, ϵ 由模糊控制器计算得出);模糊 PID 控制中,由模糊控制计算出 K_P, K_I, K_D ,优化 PID 控制器的参数。

系统温度输出曲线如图 6 所示。3 种控制系统的性能指标如表 2 所示。在调节时间上,3 种控制器的调节时间分别为: $t_{s_FPID} = 18.5\ \text{min}, t_{s_IFSMC} = 7.3\ \text{min}, t_{s_FSMC} = 16.2\ \text{min}$ 。与炒药机的模糊 PID 控制相比,模糊 PID 控制虽然前期有较快的加热速率,但是在积分环节的作用下,仍有少许超调现象,温度最大值达到 $180\ \text{℃}$,将严重影响成品质;而无论传统模糊滑模控制还是改进模糊滑模控

制,超调量 $\sigma\%$ 均约为 0;且温度过调节后,由于模糊控制减小了比例系数,因此回调的速度明显偏慢。在 $t=1\sim 5\ \text{min}$ 内,与传统模糊滑模控制相比,带有指数滑模面的改进模糊滑模控制器因恒功率加热而具有更快的加热速度。在误差较小时,由于模糊控制的调节,增大了幂次切换增益的权重系数,使得系统运动点在跨越滑模面时,其运动速率可以更快的衰减到 0,从而减小了抖振。表 2 中数据表明:相比于传统模糊滑模控制,本文的控制方法调节时间缩短了 54.94%。

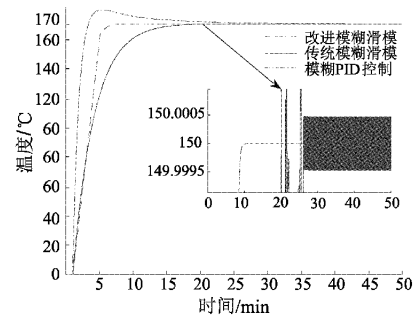


图 6 系统温度输出

表 2 三种控制系统性能指标对比

控制系统	t_s/min	超调量($\sigma\%$)
模糊 PID 控制	18.5	6.6%
传统模糊滑模控制	16.2	$\approx 0\%$
改进模糊滑模控制	7.3	$\approx 0\%$

4.3 控制器输出

控制器输出曲线如图 7 所示。在 $t=1\ \text{min}$ 时给系统加入阶跃输入,由图 7 可以看出,在改进模糊滑模控制器中指数滑模面的作用下, $t=1\sim 5\ \text{min}$ 内控制器的输出接近最大加热功率; $t=5\sim 10\ \text{min}$ 内,由于误差较小,控制信号逐渐减小。传统模糊滑模控制的作用下,控制器的输出呈指数下降,虽然在初始阶段可以迅速提升温度,但在 $t=2\ \text{min}$ 后,控制器的输出明显下降,且在稳定阶段,有明显的输出抖振。

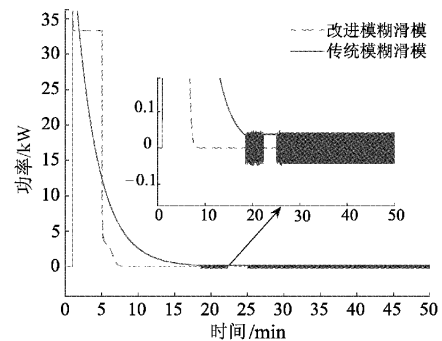


图 7 控制器输出

4.4 扰动信号下系统的输出

在 $t=30\text{ min}$ 时为系统加入幅值为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、持续时间为 4 min 的半波正弦扰动信号,模拟工作中不确定性因素带来的温度骤升,该扰动下系统温度输出曲线如图 8(a) 所示。

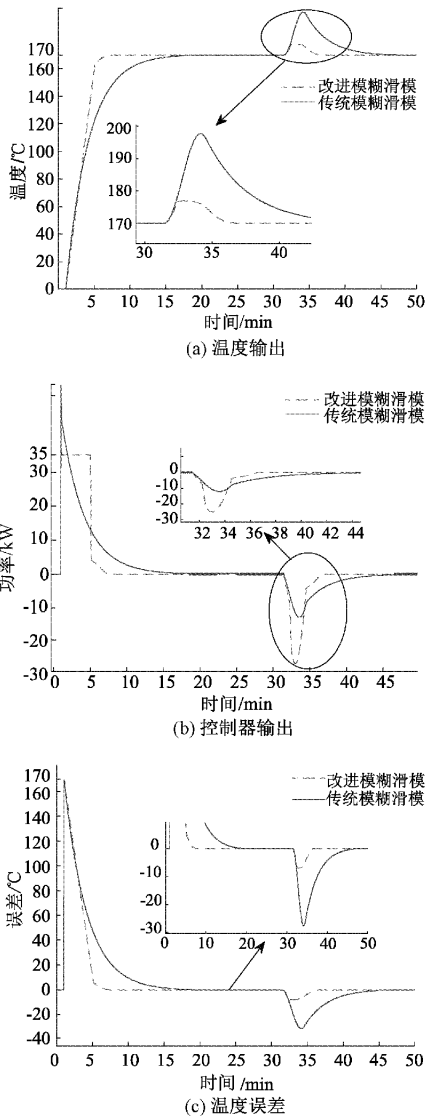


图 8 扰动信号下系统性能曲线

由图 8(a)可以看出,面对扰动信号,改进模糊滑模控制具有更快的响应速度,恢复时间约为 5 min ,动态降落约为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$;而传统模糊滑模控制,在扰动信号的作用下,温度上升至 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,且消除扰动信号作用的时间约为 12 min 。

扰动信号的作用下,控制器的输出如图 8(b)所示。由图 8(b)可以看出,面对扰动信号时,相比于传统模糊滑模控制,改进模糊滑模控制的响应时间更短,且提供更高的输出来弥补扰动信号带来的误差;在误差信号逐渐减小的过程中,改进模糊滑模控制输出的回调速度更快。

扰动信号作用下的温度误差曲线如图 8(c)所示。由图 8(c)可以看出,在扰动信号的作用下,改进模糊滑模控制的误差峰值约为 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$,而传统模糊滑模控制的误差峰值约为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;且在扰动信号幅值减小的阶段,相比于传统模糊滑模控制,改进模糊滑模控制消除误差的时间更短。

4.5 实际应用效果

为探究本方法的有效性,在 2021 年 12 月 23 日,结合某公司生产的电磁炒药机设备(滚筒型号 CZJ920),对其温度控制算法进行改进,应用本文所设计的控制方法,测量其炒制温度。该设备可以实现数据的显示、报警信息等功能,控制器为台达 ES2 系列 PLC,显示设备为台达 12 寸 PLC 配套触摸屏,通过 RS-485 通讯,设备如图 9 所示。

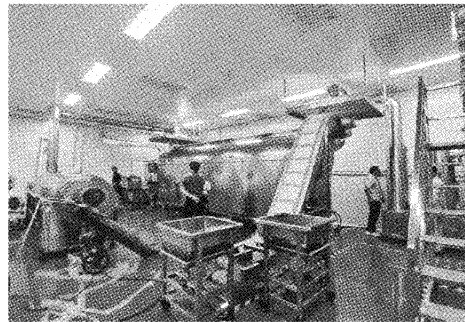


图 9 炒药机实验现场照片

本次实验,原材料为小麦,炒制方法为清炒。该设备采用三段式加热区间(额定加热功率 $90\sim 120\text{ kW}$ 、最大加热温度 $< 320\text{ }^{\circ}\text{C}$),设定温度均为 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$;温度测量包括筒体内部三处和外部出料口处红外传感器共 4 个红外温度传感器。该设备控制器控制系统原采用 PID 控制,温度波动幅值较大,在 $\pm 7\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制效果较差。

在应用本文的控制方法后,4 处温度检测输出曲线波形如图 10 所示。从图 10 中可以看出,在本文设计的控制方法下,炒制温度被抑制在要求范围下 ($\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$),可以满足中药炒制的要求。

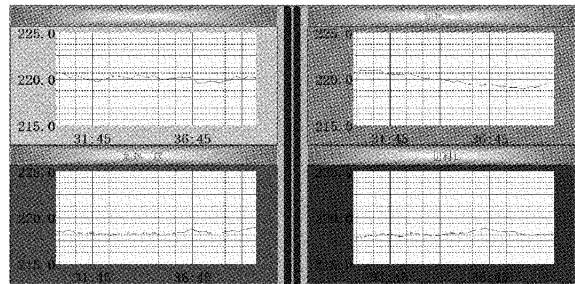


图 10 炒药机温度显示屏

该系统每 10 s 向 SCADA 系统发送温度信息,将该信息记录汇总至表 3,本文记录了三个加热区域 3 min 内的温度信息。从表 3 中可以看出,与给定值 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比,3 个加热区域温度波动幅度最大的为加热三区,在 $\pm 2.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以

内;温度波动幅度最小的为加热一区,在 $\pm 0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,满足中药炒制的工艺要求。

表 3 三个加热区域温度输出数据记录

时间/s	一区温度/ $^{\circ}\text{C}$	二区温度/ $^{\circ}\text{C}$	三区温度/ $^{\circ}\text{C}$
0	220.50	220.91	218.42
10	220.61	220.72	218.43
20	220.73	221.04	218.38
30	220.62	221.27	218.43
40	220.45	221.23	218.56
50	220.24	221.23	218.48
60	220.03	221.23	218.38
70	220.36	221.22	218.32
80	220.53	221.26	218.24
90	220.50	221.31	218.18
100	220.38	221.06	218.09
110	220.22	220.83	218.06
120	219.98	220.70	218.04
130	219.77	220.55	218.05
140	219.62	220.56	218.01
150	219.55	220.56	217.88
160	219.74	220.55	217.99
170	219.95	220.57	218.03
180	219.01	220.56	218.01
max	220.73	221.31	218.56
min	219.01	220.55	217.88
平均值	220.147	220.914	218.209

5 结 论

本文为了提高电磁炒药机温度控制系统的温度控制精度和响应速度,改善中药自动化炒制的质量,提出了一种带有指数滑模面的变幂-指数权重系数切换增益模糊滑模温度控制方法。

在传统模糊滑模控制的基础上,设计了用带有指数函数的滑模面代替传统滑模面,在系统误差较大时,能够以最大加热功率加热,提高了温度响应速度。设计了一种变权重系数幂-指切换增益的指数滑模趋近律,通过模糊控制,调节权重系数。在较大误差下,利用指数函数的快速性使系统获得更快的响应速度;在较小误差下,利用幂函数快速衰减的特性,减弱抖振。

建立了带有指数滑模面的变权重系数幂-指切换增益模糊滑模温度控制系统的仿真模型,仿真结果表明:相比于传统模糊滑模控制,改进模糊滑模控制的调节时间缩短了 54.94%;超调量减小到了 0%,加热系统无超调;实际应用效果表明:本文设计的控制方法,可以满足中药炒制过程中对温度控制精度的要求。

参考文献

- [1] ZHANG R D, XUE A K, GAO F R. Temperature control of industrial coke furnace using novel state space model predictive control [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2084-2092.
- [2] 吕振鹏, 毕凤荣, XU W, 等. 车辆半主动座椅悬架自适应模糊滑模控制[J]. 振动与冲击, 2021, 40(2): 265-271.
- [3] 刘洋, 行鸿彦, 侯天浩. 四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 46-52.
- [4] 徐新, 邓斌, 王奇, 等. 基于自整定模糊 PID 的艾灸点皮肤温度控制系统[J]. 电子测量技术, 2020, 43(22): 39-44.
- [5] LI R X, WU F, HOU P Z, et al. Performance assessment of FO-PID temperature control system using a fractional order LQG benchmark[J]. IEEE Access, 2020, 8: 116653-116662.
- [6] 冯旭刚, 鲍立昌, 章家岩, 等. 热风炉拱顶温度模糊自适应滑模控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(6): 150-157.
- [7] 邓丽, 黄炎, 费敏锐, 等. 改进的广义预测控制及其在温度系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1057-1064.
- [8] 李晓栋, 廖宇新, 廖俊, 等. 可重复使用运载火箭一子级垂直回收有限时间滑模控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(4): 979-988.
- [9] 程涛, 李红岩. 超螺旋滑模控制的永磁同步电机 DTC 优化[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(1): 1-7.
- [10] SONG X, SONG S. Fuzzy sliding mode control for fractional-order unified chaotic system[C]. 2016 IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA), 2016: 1090-1095.
- [11] 郑美茹, 王圣, 王丰, 等. 基于分数阶符号函数的永磁同步电机滑模控制技术[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 56-62.
- [12] 章家岩, 张子蒙, 冯旭刚. 转炉炉口微差压的模糊滑模控制系统设计[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 142-148, 157.
- [13] ZHENG L, ZHOU SH, XIAO Y, et al. Sensorless vector control of permanent magnet synchronous linear motor based on self-adaptive super-twisting sliding mode controller [J]. IEEE Access, 2019, 7: 44998-45011.
- [14] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.
- [15] 尤波, 宁继超, 贾德利, 等. 基于自适应控制的电磁加热系统[J]. 控制工程, 2011, 18(6): 962-965.

作者简介

赵龙,工学硕士,主要研究方向为自动化技术与装置。

E-mail: zlsdut5314@163.com

杜钦君,工学博士,教授,主要研究方向为机器人技术、电机及驱动控制技术。

E-mail: duqinjun@sdut.edu.cn