

热风炉拱顶温度模糊自适应滑模控制策略

冯旭刚, 鲍立昌, 章家岩, 王兵, 魏新园, 王胜, 魏舜昊, 徐帅, 陈雨薇

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 243032, 安徽马鞍山)

摘要: 针对高炉热风炉拱顶温度控制的大惯性、纯滞后和超调大的特点, 提出一种模糊自适应滑模控制策略。将滑模控制强鲁棒性的特点与模糊自适应控制的良好逼近能力相结合, 并考虑到系统不确定项和外部干扰会使系统状态偏离滑模面, 引入附加控制项使系统轨迹能够在有限时间内趋向滑模面; 利用模糊自适应控制逼近系统未知参数和不确定项, 抵消由建模误差和外部扰动对系统的影响, 实现对逼近误差的修正和补偿; 借助 Lyapunov 方法导出模糊自适应律, 通过调节自适应权重保证整个闭环系统的收敛性和稳定性。仿真结果表明: 模糊自适应滑模控制策略与 PID 和常规滑模控制相比, 加入干扰后调节时间最多减少 35 s, 超调量最多降低 12.1%, 系统抖振较常规滑模控制最多降低 16%。工程应用表明: 使用所提策略后, 拱顶温度上下波动幅度小, 偏差小于 $\pm 5^{\circ}\text{C}$, 系统稳定性和抗干扰能力显著提高, 表明该模糊自适应滑模控制器具有抖振小、响应快、精度高的特点。

关键词: 高炉热风炉; 拱顶温度; 滑模控制; 模糊自适应控制

中图分类号: TF578 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202106018 **文章编号:** 0253-987X(2021)06-0150-08



OSID 码

Fuzzy Adaptive Sliding Mode Control Strategy for Vault Temperature of Hot Blast Stove

FENG Xugang, BAO Lichang, ZHANG Jiayan, WANG Bing, WEI Xinyuan,
WANG Sheng, WEI Shunhao, XU Shuai, CHEN Yuwei

(College of Electrical Engineering and Information, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of large inertia, pure hysteresis and large overshoot of blast furnace hot blast stove vault temperature control, a fuzzy adaptive sliding mode control strategy is proposed. Combining the strong robustness of sliding mode control with the good approximation ability of fuzzy adaptive control, and considering that system uncertainties and external disturbances will cause the system state to deviate from the sliding mode surface, additional control items are introduced to enable the system trajectory to tend to the sliding mode surface within a finite time; fuzzy adaptive control is used to approximate the unknown parameters and uncertain terms of the system, so as to offset the influence of modeling errors and external disturbances on the system, and realize the correction and compensation of the approximation error; the Lyapunov method to derive the fuzzy adaptive law to ensure the convergence and stability of the entire closed-loop system by adjusting the adaptive weights.

收稿日期: 2020-11-11。 作者简介: 冯旭刚(1977—),男,教授;章家岩(通信作者),男,教授。 基金项目: 安徽省重点研究与开发计划资助项目(1804a09020094);安徽省高校自然科学研究重点资助项目(KJ2018A0060);安徽省自然科学基金资助项目(1908085ME134)。

网络出版时间: 2021-03-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210304.1646.006.html>

Simulation results show that compared with PID control and conventional sliding mode control, the fuzzy adaptive sliding mode control strategy can reduce the adjustment time by up to 35 s after interference is added, the overshoot can be reduced by up to 12.1%, and the system chattering can be reduced by up to 16% compared with the conventional sliding mode control. Engineering application shows that after using the proposed strategy, the vault temperature has a smaller fluctuation range, the deviation is less than $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the system stability and anti-interference ability are significantly improved, which indicates that the fuzzy adaptive sliding mode controller has smaller chattering, faster response, and higher precision.

Keywords: blast furnace hot blast stove; vault temperature; sliding mode control; fuzzy adaptive control

热风炉使用的燃料是炼铁生产过程中产生的高炉煤气,其压力和热值波动较大,故造成拱顶温度难以控制稳定^[1]。高风温技术是钢铁企业实现高炉节能的关键技术之一,然而若要提高高炉热风炉送风温度,就必须同步提高热风炉的拱顶温度^[2-3]。因此,合理控制拱顶温度,对于保证高炉设备的安全稳定运行,提高企业经济效益具有重要意义。

工程上,针对热风炉拱顶温度通常采用常规的PID控制方法,难以达到理想的控制效果。为此,国内外专家学者针对拱顶温度控制进行了多种先进控制策略的研究。文献[4]提出数学模型控制法,基于热风炉炉内热平衡建立数学模型,较好地反应了热风炉燃烧过程中的变化情况。由于该方法需要在现场安装众多高精度检测装置来获取热风炉的状态信息,且这些装置的运行状况对数学模型的推导和数值演算有直接影响,因此该方法仍存在一定程度的局限性和不足。文献[5]提出了一种基于RBF神经网络整定的PID控制策略,在常规热风炉温控系统的基础上,通过改进串级控制实现热风炉的燃烧优化调整,将外环改为采用RBF神经网络整定的PID控制,通过RBF神经网络算法对增量式PID参数进行调整。由于RBF神经网络易陷入局部极小值,且径向基层与输出层之间的联接权求解存在病态问题,易造成控制参数整定错误。文献[6]在考虑炉内压力变化的基础上建立了外燃式热风炉烧炉过程的三维模型,模型考虑了蓄热砖区域内燃料与空气的湍流混合物、燃烧反应、浮力对流、热辐射和热交换,然后将计算结果与实际测量数据进行比较,以验证所提数学模型的准确性和可用性。所建模型的求解结果为热风炉烧炉末期的温度场分布情况,仅能为热风炉的工艺结构设计提供指导,对热风炉燃烧过程的实时调控意义不大。文献[7]以热风炉拱顶温度为被控对象,根据非参数预估原理,设计出一种应

用于拱顶温度预估补偿环节的非参数在线预估器,组成具有非参数在线预估器的模糊控制系统。但是,预估器所需设置参数众多且计算方式复杂,不利于工程实际。

本文提出了一种拱顶温度模糊自适应滑模控制策略,借助模糊控制的万能逼近特性,实现热风炉拱顶温度模型未知部分的自适应逼近,有效降低了模糊增益。通过反馈校正技术,利用拱顶温度跟踪误差,实时更正模型参数,抑制拱顶温度在调节过程中的超调和滑模抖振,从而达到有效提高拱顶温度控制系统抑制扰动能力的目的。

1 拱顶温度控制系统特性

拱顶温度是表征热风炉运行状态的重要参数,关系到热风炉的安全稳定运行,是衡量燃料流量与助燃空气流量是否匹配的重要标志^[8-9]。热风炉燃烧控制的主要任务是保证拱顶温度快速达到设定值并维持稳定,当拱顶温度过高时,为避免烧损热风炉炉底结构部件,应在减小燃料量的同时增大助燃空气流量。当拱顶温度过低时,为提高热风温度,应同时增大燃料量和助燃空气流量。在保证拱顶温度稳定的情况下,以此来调节空燃比提高废烟气的温升速率,保证热风炉经济高效运行^[10-13]。

由文献[15]可知,热风炉拱顶温度模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} x^{(n)} &= f(\mathbf{X}, t) + g(\mathbf{X}, t)u + d(t) \\ y &= x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}=[x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ 为系统状态矢量; n 为非线性不确定系统阶次; $u \in \mathbf{R}$ 表示系统输入燃料量; $f(\mathbf{X}, t)$ 是系统未知非线性连续函数; $g(\mathbf{X}, t)$ 是系统未知控制增益; $d(t)$ 表示建模误差及外部干扰等未知不确定项。

2 拱顶温度控制策略设计

本文设计的拱顶温度模糊自适应滑模控制方案如图1所示。其中, y_d 为拱顶温度设定值, $e = y_d - y$ 为系统跟踪误差, 非线性不确定系统阶次为 2, s 和 $\dot{s}$ 为切换函数及其变化率, $\hat{f}(\mathbf{X}, t)$ 、 $\hat{g}(\mathbf{X}, t)$ 和 $\hat{\omega}$ 分别为热风炉拱顶温度控制系统的非线性连续函数、未知控制增益和系统总不确定项的模糊逼近值。将拱顶温度实际输出值和设定值之间的偏差引入滑模切换函数, 利用切换函数及其变化率和模糊控制器相结合, 实现对当前时刻系统参数的模糊逼近。利用基于 Lyapunov 函数稳定性分析得出的模糊控制规则自适应律对自适应系数进行优化, 使模糊系统输出随着拱顶温度变化而变化, 从而得到更精确的控制律。

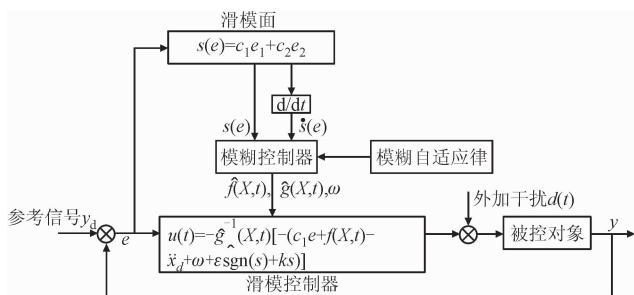


图1 拱顶温度模糊自适应滑模控制框图

Fig. 1 Block diagram of fuzzy adaptive sliding mode control of vault temperature

2.1 滑模变结构控制策略

在实际控制系统中, 由于外部干扰的上界很难确定, 且系统参数 $f(\mathbf{X}, t)$ 和 $g(\mathbf{X}, t)$ 往往未知。所以在常规滑模控制中, 常给定一个较大的上界值来确保系统的稳定性, 但这会造成系统控制律过大, 进而导致系统抖振剧烈^[9,15]。本文采用如下方法解决这一难题, 设

$$\left. \begin{aligned} f(\mathbf{X}, t) &= \hat{f}(\mathbf{X}, t) + \Delta f(\mathbf{X}, t) \\ g(\mathbf{X}, t) &= \hat{g}(\mathbf{X}, t) + \Delta g(\mathbf{X}, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\hat{f}(\mathbf{X}, t)$ 和 $\hat{g}(\mathbf{X}, t)$ 分别是 $f(\mathbf{X}, t)$ 和 $g(\mathbf{X}, t)$ 的标称部分; $\Delta f(\mathbf{X}, t)$ 和 $\Delta g(\mathbf{X}, t)$ 分别是 $f(\mathbf{X}, t)$ 和 $g(\mathbf{X}, t)$ 的不确定部分。那么, 式(1)可表示为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}^{(n)} &= \hat{f}(\mathbf{X}, t) + \hat{g}(\mathbf{X}, t)u + \omega \\ y &= x \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\omega = \Delta f(\mathbf{X}, t) + \Delta g(\mathbf{X}, t)u + d(t)$ 为系统不确定项总和。

拱顶温度控制系统的控制目标是当系统存在外部干扰和模型不确定项的情况下, 设计控制律使拱

顶温度实际输出 y 跟随期望输出 y_d 。

定义跟踪误差为

$$e = y_d - y = x_d - x \quad (4)$$

定义切换函数为

$$s(e) = \mathbf{C}^T e \quad (5)$$

式中: $\mathbf{e} = [e_1, \dots, e_n]^T = [x_d - x, \dots, x_d^{(n-1)} - x^{(n-1)}]^T$; 滑模面系数 $\mathbf{C}^T = [c_1, \dots, c_n] > 0$, 设 $c_n = 1$, 且满足 Hurwitz 多项式。

根据以上推导, 等效控制项为

$$u_{eq} = \frac{1}{\hat{g}(x, t)} \left[\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - \hat{f}(x, t) - \omega + x_d^{(n)} \right] \quad (6)$$

在实际控制过程中, 由于系统存在不确定项和外部干扰, 系统状态会偏离滑模面, 因此有必要引入附加控制项, 使系统轨迹在有限时间内趋向滑模面。附加控制项设为

$$u_n = \frac{1}{\hat{g}(x, t)} [-\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks] \quad (7)$$

那么, 最终选取的拱顶温度控制律为

$$u = u_{eq} + u_n \quad (8)$$

2.2 模糊自适应滑模控制策略

为进一步降低抖振, 提高系统自适应能力和响应速度, 抵消由建模误差和外部扰动对系统的影响, 设计模糊自适应控制器, 估计未知非线性函数和系统总的不确定项。

当 f 、 g 和 ω 未知时, 控制律式(8)显然不适用, 则可利用模糊系统逼近 $\hat{f}(x, t)$ 、 $\hat{g}(x, t)$ 和 $\hat{\omega}$ 。设模糊控制器为两输入三输出系统, 输入分别为 s 和 $\dot{s}$, 输出分别为 $\hat{f}(x, t)$ 、 $\hat{g}(x, t)$ 和 $\hat{\omega}$, 选取 s 的模糊论域为 $[-5, +5]$, $\dot{s}$ 的模糊论域为 $[-0.25, +0.25]$ 。定义输入变量模糊集为 $A_i^j (i=1, 2; j=1, 2, \dots, 5)$, 则变量 s 的隶属函数定义为

$$\mu_{A_1^1}(e) = \exp \left[- \left(\frac{e + \pi/60}{\pi/240} \right)^2 \right]$$

$$\mu_{A_1^2}(e) = \exp \left[- \left(\frac{e + \pi/120}{\pi/240} \right)^2 \right]$$

$$\mu_{A_1^3}(e) = \exp \left[- \left(\frac{e}{\pi/240} \right)^2 \right]$$

$$\mu_{A_1^4}(e) = \exp \left[- \left(\frac{e - \pi/120}{\pi/240} \right)^2 \right]$$

$$\mu_{A_1^5}(e) = \exp \left[- \left(\frac{e - \pi/60}{\pi/240} \right)^2 \right]$$

变量 $\dot{s}$ 的隶属函数定义为

$$\mu_{A_2^1}(\dot{e}) = \exp \left[- \left(\frac{\dot{e} + \pi/3}{\pi/12} \right)^2 \right]$$

$$\begin{aligned}\mu_{A_2^2}(e) &= \exp\left[-\left(\frac{e+\pi/6}{\pi/12}\right)^2\right] \\ \mu_{A_2^3}(e) &= \exp\left[-\left(\frac{e}{\pi/12}\right)^2\right] \\ \mu_{A_2^4}(e) &= \exp\left[-\left(\frac{e-\pi/6}{\pi/12}\right)^2\right] \\ \mu_{A_2^5}(e) &= \exp\left[-\left(\frac{e-\pi/3}{\pi/12}\right)^2\right]\end{aligned}$$

定义模糊逼近调节规则如表 1 所示。

表 1 模糊逼近调节规则表

Table 1 Fuzzy approximation adjustment rule table

s	$s=NB$	$s=NS$	$s=ZE$	$s=PS$	$s=PB$
PB	NS	PS	NM	NB	NS
PS	NB	ZE	PS	ZE	NS
ZE	NB	NS	PL	PB	PS
NS	NB	ZE	PS	ZE	NS
NB	NB	NB	NB	NB	NS

采用乘积推理机、单值模糊器和重心法将模糊变量反解出来,得到模糊控制器的输出为

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^k \theta_j \left(\prod_{i=1}^{\sigma} \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^k \left(\prod_{i=1}^{\sigma} \mu_{A_i^j}(x_i) \right)} = \theta^T \xi(x) \quad (9)$$

式中: $\mu_{A_i^j}(x_i)$ 为高斯隶属函数; $\xi(x)$ 为模糊基函数; k 为模糊规则个数; $\theta^T = [\theta_1, \dots, \theta_j, \dots, \theta_k]$ 为可调参数矢量,并将其引入模糊规则集合; $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_j, \dots, \xi_k]$ 为模糊基函数矢量; σ 为模糊控制器输入量的个数。定义模糊基函数为

$$\xi(x) = \prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^j}(x_i) / \sum_{j=1}^k \prod_{i=1}^2 \mu_{A_i^j}(x_i) \quad (10)$$

根据模糊系统的万能逼近特性,用 $\hat{f}(x, t)$ 、 $\hat{g}(x, t)$ 和 $\hat{\omega}$ 来逼近 f 、 g 和 ω

$$\left. \begin{aligned}\hat{f}(x | \theta_f) &= \theta_f^T \xi(x) \\ \hat{g}(x | \theta_g) &= \theta_g^T \xi(x) \\ \hat{\omega}(x | \theta_\omega) &= \theta_\omega^T \xi(x)\end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $\hat{f}(x | \theta_f)$ 、 $\hat{g}(x | \theta_g)$ 和 $\hat{\omega}(x | \theta_\omega)$ 为模糊系统输出;参数 θ_f^T 、 θ_g^T 和 θ_ω^T 根据自适应律而变化。

定义最小逼近误差为

$$\psi = f(x, t) - \hat{f}(x | \theta_f^*) + g(x, t)u - \hat{g}(x | \theta_g^*)u - \hat{\omega}(x | \theta_\omega^*) \quad (12)$$

定义最优参数向量为

$$\left. \begin{aligned}\theta_f^* &= \arg \min_{\theta_f \in \Omega_f} \left[\sup_{x \in R^n} |\hat{f}(x | \theta_f) - f(x, t)| \right] \\ \theta_g^* &= \arg \min_{\theta_g \in \Omega_g} \left[\sup_{x \in R^n} |\hat{g}(x | \theta_g) - g(x, t)| \right] \\ \theta_\omega^* &= \arg \min_{\theta_\omega \in \Omega_\omega} \left[\sup_{x \in R^n} |\hat{\omega}(x | \theta_\omega) - \omega(x, t)| \right]\end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: Ω_f 、 Ω_g 和 Ω_ω 分别是 θ_f 、 θ_g 和 θ_ω 的集合。

根据模糊逼近原理,在任意致密集 $U \in \mathbf{R}^n$ 上必定存在连续函数 θ_f^* 、 θ_g^* 和 θ_ω^* 满足最小逼近误差。

由此,拱顶温度控制律变为

$$u(t) = -g^{-1}(X, t) \left[-\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + \hat{f}(X, t) - x_d^{(n)} + \dot{\omega} + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks \right] \quad (14)$$

对控制器稳定性进行 Lyapunov 分析,则

$$\begin{aligned}\dot{s} &= -\sum_{i=1}^n c_i e^{(i)} = -\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + x^{(n)} - x_d^{(n)} = \\ &= -\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + f(x, t) + gu(t) + (g(x, t) - \hat{g}(x, t))u(t) + \\ &\quad \hat{g}(x, t)u(t) + d(t) - x_d^{(n)} = \\ &= f(x, t) - \hat{f}(x, t) + (g(x, t) - \hat{g}(x, t))u(t) + \\ &\quad d(t) - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks - \dot{\omega} = \\ &= \hat{f}(x | \theta_f^*) - \hat{f}(x, t) + (g(x | \theta_g^*) - \hat{g}(x, t))u(t) - \\ &\quad \dot{\omega}(x, t) + d(t) + \psi - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks - \dot{\omega}(x | \theta_\omega^*) = \\ &= \varphi_f^T \xi(x) + \varphi_g^T \xi(x) + \varphi_\omega^T \xi(x) + \psi + d(t) - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks\end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\varphi_f = \theta_f^* - \theta_f$; $\varphi_g = \theta_g^* - \theta_g$; $\varphi_\omega = \theta_\omega^* - \theta_\omega$ $n=1$ 。

定义 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \left(s^2 + \frac{1}{r_1} \varphi_f^T \varphi_f + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T \varphi_g + \frac{1}{r_3} \varphi_\omega^T \varphi_\omega \right) \quad (16)$$

则

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{r_1} \varphi_f^T \dot{\varphi}_f + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T \dot{\varphi}_g + \frac{1}{r_3} \varphi_\omega^T \dot{\varphi}_\omega = \\ &= s[\varphi_f^T \xi(x) + \varphi_g^T \xi(x) + \varphi_\omega^T \xi(x) + \omega + d(t) - \\ &\quad \varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks] + \frac{1}{r_1} \varphi_f^T \dot{\varphi}_f + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T \dot{\varphi}_g + \frac{1}{r_3} \varphi_\omega^T \dot{\varphi}_\omega = \\ &= \frac{1}{r_1} \varphi_f^T [r_1 s \xi(x) + \dot{\varphi}_f] + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T [r_2 s \xi(x) + \dot{\varphi}_g] + \\ &\quad \frac{1}{r_3} \varphi_\omega^T [r_3 s \xi(x) + \dot{\varphi}_\omega] + s[\psi + d(t) - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks] = \\ &= \frac{1}{r_1} \varphi_f^T [r_1 s \xi(x) + \dot{\varphi}_f] + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T [r_2 s \xi(x) + \dot{\varphi}_g] + \\ &\quad \frac{1}{r_3} \varphi_\omega^T [r_3 s \xi(x) + \dot{\varphi}_\omega] + s\psi + sd(t) - \varepsilon |s| - ks^2\end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\dot{\varphi}_f = -\dot{\theta}_f$; $\dot{\varphi}_g = -\dot{\theta}_g$; $\dot{\varphi}_\omega = -\dot{\theta}_\omega$ 。

由模糊控制理论可知,模糊控制可以在紧密集上以任意精度逼近任意连续函数。由于模糊规则的限制,导致实际工程应用中模糊控制会产生较大误差^[16-18]。因此,本文需要在模糊控制的基础上引入自适应控制律对自适应系数 r_1 、 r_2 和 r_3 进行优化,使模糊系统输出随着拱顶温度变化进行实时调节,从而使控制律更加精确。

由式(17)可知,自适应律应选择为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}_f &= r_1 s \xi(x) \\ \dot{\theta}_g &= r_2 s \xi(x) u \\ \dot{\theta}_\omega &= r_3 s \xi(x) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将自适应律式(18)代入式(17),得

$$\dot{V} = s\psi + sd(t) - \varepsilon |s| - ks^2 \quad (19)$$

式中: r_1, r_2, r_3 为自适应系数,为正常数。因此,只需满足 $\varepsilon \geq D + \eta$, D 为系统干扰上界, η 为大于零的常数,则 $\dot{V} \leq s\psi - ks^2$ 。根据模糊逼近理论可知,自适应模糊系统可使逼近误差 ψ 非常小,因此 $\dot{V} \leq 0$ 。当 $\dot{V} = 0$ 时, $s = 0$, 则根据 Lasalle 不变集原理, $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$ 。由此可见,系统能够在有限时间内到达滑模面且渐进稳定。

3 仿真分析

为验证本文提出的模糊自适应滑模控制策略的有效性,利用 Matlab 软件进行仿真。以文献[15]中的拱顶温度模型作为仿真对象,并将状态空间表达式转换为传递函数形式,参数设定方法参考文献[19]和[20]。经过多次仿真验证,参数设定如下: $r_1 = 43.6336, r_2 = 35.1477, r_3 = 60.8280, k = 3.49, \varepsilon = 4.2, c_1 = 8.1474, c_2 = 3.2651$, 向量 φ_f^T, φ_g^T 和 φ_ω^T 的初始值设为 0.1。拱顶温度模型为

$$G(s) = \frac{161}{201s + 1} e^{-10s} \quad (20)$$

(1)为检验控制算法的模糊逼近能力,对模型未知参数和不确定项模糊逼近仿真,仿真结果如图2~5所示。

由图2~图5可知,模糊自适应滑模算法对系统不确定项、未知函数和未知控制增益具有良好的跟随逼近能力,不确定项逼近误差小于 ± 4 , 连续函数 $f(x)$ 的逼近误差小于 ± 0.01 , 控制增益 $g(x)$ 的逼近误差小于 ± 0.04 , 可见模糊自适应滑模控制能够得到较为精确的对象模型参数。

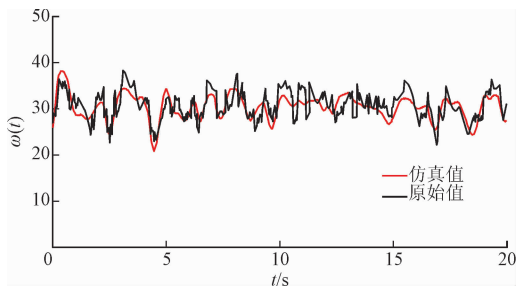


图2 模型不确定项 $\omega(t)$ 模糊逼近仿真

Fig. 2 Fuzzy approximation simulation of model uncertainty $\omega(t)$

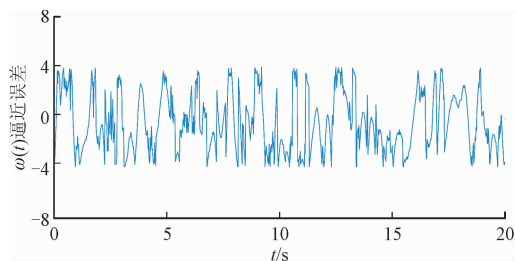


图3 模型不确定项 $\omega(t)$ 模糊逼近误差

Fig. 3 Fuzzy approximation error of model uncertainty $\omega(t)$

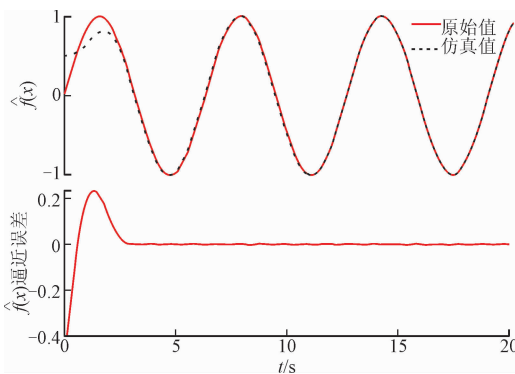


图4 $\hat{f}(x)$ 模糊逼近仿真

Fig. 4 Fuzzy approximation simulation of $\hat{f}(x)$

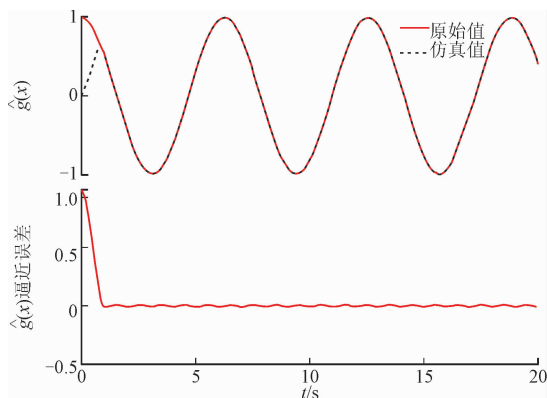


图5 $\hat{g}(x)$ 模糊逼近仿真

Fig. 5 Fuzzy approximation simulation of $\hat{g}(x)$

(2)为验证控制算法的抗干扰性能,同时对 PID 控制、常规滑模控制和本文提出的模糊自适应滑模控制施加阶跃信号。拱顶温度设定值为 1200°C , 并在运行 45 s 时加入幅值为 20% 的阶跃干扰, 观察抗干扰效果和输出变化情况。仿真结果如图6和图7所示。

由图6可知,常规 PID 控制的稳定时间为 40 s, 常规滑模控制的稳定时间为 22 s, 模糊自适应滑模的稳定时间为 9.2 s。当加入 20% 的阶跃干扰后, 常规 PID 控制的调节时间为 46 s, 超调量为 20.9%, 常规滑模控制的调节时间为 19 s, 超调量为

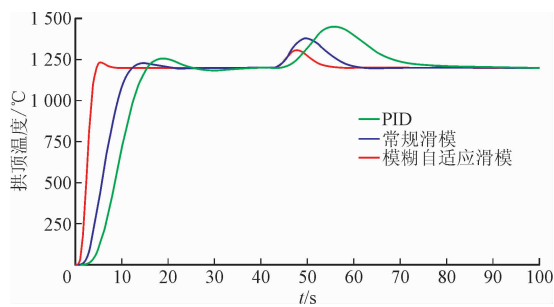


图 6 拱顶温度阶跃响应对比图

Fig. 6 Comparison of vault temperature step responses

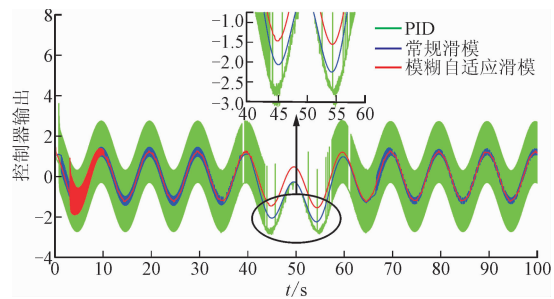


图 7 控制器输出对比图

Fig. 7 Controller output comparison

14.8%，模糊自适应滑模的调节时间为 11 s，超调量为 8.8%。由图 7 可知，在加入干扰后，模糊自适应滑模控制器的输出抖振、常规滑模控制器输出抖振和 PID 控制器输出抖振相比分别降低了 16% 和 37.5%。由此可见，模糊自适应滑模控制策略相比常规滑模和 PID 控制策略的抗干扰能力更好，并能够在消除抖振的同时获得较快的响应速度，取得更好的控制效果。

(3)为进一步验证模糊自适应滑模控制策略的跟随性能和鲁棒性能，向系统施加 $\sin(\pi t)$ 的连续干扰信号，设定信号为 $y_d = 200\sin(0.033\pi t) + 1\ 200$ ，仿真结果如图 8 所示。

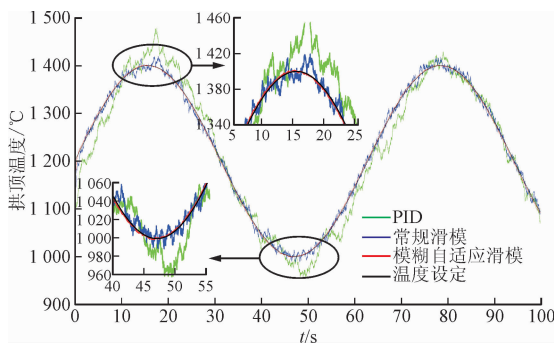


图 8 跟随性能仿真对比图

Fig. 8 Following performance simulation comparison

由图 8 可知，在相同的干扰信号下，模糊自适应

滑模控制策略的跟踪误差在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，常规滑模控制策略的跟踪误差在 $\pm 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，PID 控制策略的跟踪误差在 $\pm 64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。对比 3 种控制策略可知，在连续扰动下，模糊自适应滑模控制策略的收敛性更好，位置跟随误差更小，鲁棒性更强。表明本文设计的模糊自适应滑模控制策略可以很好地实现对热风炉拱顶温度外部干扰的自适应逼近，从而提升拱顶温度的控制精度。

4 工程应用

为检验模糊自适应滑模控制策略的有效性，本文以某炼铁厂 2 060 m³ 高炉配套的 4 座顶燃式热风炉拱顶温度为对象进行工程应用。采用本文的控制策略，控制系统为施耐德 PLC，在不改变原系统结构和硬件配置情况下，增加一套由燃烧优化控制器和监控计算机组成的热风炉拱顶温度优化控制系统。监控计算机与优化控制器之间通过工业以太网采用 OPC 协议进行数据通讯，而优化控制器与现有 PLC 系统操作员站则通过 OPC 协议进行联接和信息传输。现场的 PLC 系统由 I/O 设备及检测元件、变送器、驱动放大器、调节阀和传动设备组成，担负现场各种传感器信号的采集、处理和调节阀的实时控制，监控计算机承担数据库建立、数模计算、能效分析、集中监视、局部操作和系统设置、参数修改等工作。优化控制器主要完成数据传输、优化计算、控制指令下载和无扰切换等任务。系统具体架构如图 9 所示。

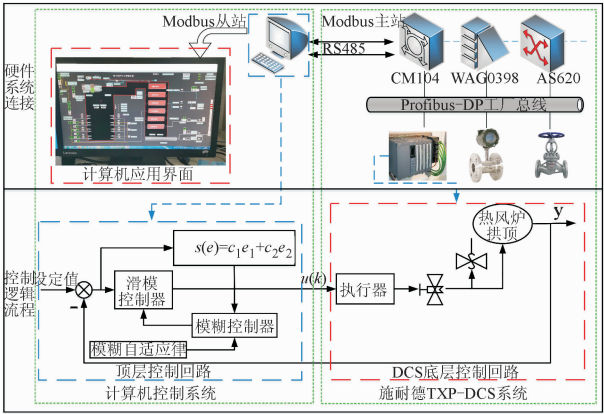


图 9 拱顶温度优化控制架构

Fig. 9 Vault temperature optimization control architecture

本文将拱顶温度模糊自适应滑模控制策略投入现场运行控制，并通过反复调试，取得了良好的控制效果。热风炉在额定负荷下连续 3 d 分别采用常规 PID 控制、滑模控制和模糊自适应滑模控制的拱顶

温度见图10~图12,拱顶温度设定值为 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$,监测时间为8 h。

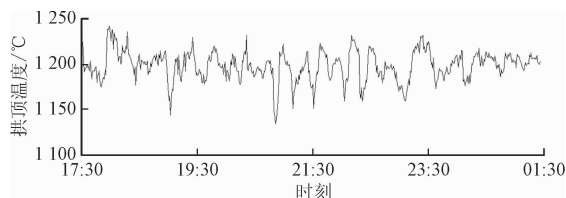


图10 PID控制策略拱顶温度实时曲线

Fig. 10 Vault temperature real-time curve from PID control strategy

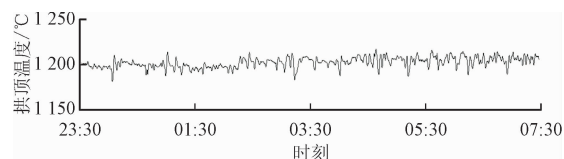


图11 常规滑模控制策略拱顶温度实时曲线

Fig. 11 Real-time curve of vault temperature from conventional sliding mode control strategy

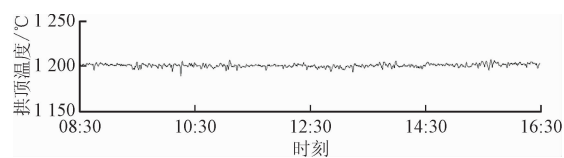


图12 模糊自适应滑模控制策略拱顶温度实时曲线

Fig. 12 Real-time curve of vault temperature based on fuzzy adaptive sliding mode control strategy

由图10~图12可知,当热风炉拱顶温度控制系统采用本文的模糊自适应滑模控制策略时,温度波动平缓且波动范围在 $\pm 5\ ^\circ\text{C}$ 以内,而采用常规滑模和PID控制策略时,温度波动剧烈且波动范围分别为 $\pm 23\ ^\circ\text{C}$ 和 $\pm 70\ ^\circ\text{C}$ 。由此可见,本文提出的模糊自适应滑模控制策略达到了良好的控制效果。

5 结 论

热风炉拱顶温度控制系统具有大惯性、超调大和纯滞后等特点,且在运行过程中易受外界干扰。鉴于常规控制方法对于拱顶温度控制无法达到较好的效果,本文提出了一种基于模糊自适应滑模控制的拱顶温度控制策略,利用模糊自适应滑模控制器补偿系统不确定扰动因素和逼近误差,从而修正位置跟踪的稳态误差,提升系统的鲁棒性。与PID和常规滑模控制策略相比,模糊自适应滑模控制策略减小了系统抖振,使控制系统具有更优越的控制精度、响应速度和稳态性能。最后,将本文控制策略应

用于某炼铁厂高炉热风炉,应用结果表明,拱顶温度控制偏差在 $\pm 5\ ^\circ\text{C}$ 以内,有效地提高了热风炉拱顶温度控制系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 蒋朝辉,周刚,张海峰,等. 顶燃式球式热风炉烧炉过程温度场建模[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(9): 2216-2224.
- JIANG Zhaohui, ZHOU Gang, ZHANG Haifeng, et al. Temperature distribution model for combustion process of hot blast stove of dome combustion ball type[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(9): 2216-2224.
- [2] 解志斌,汪晋宽,韩英华. 基于CFD的高炉热风炉联合仿真方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S1): 1005-1007.
- XIE Zhibin, WANG Jinkuan, HAN Yinghua. Co-simulation method simulation of blast furnace hot blast stove based on CFD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S1): 1005-1007.
- [3] 陈冠军,胡雄光,钱凯,等. 新型顶燃式热风炉燃烧技术研究[J]. 钢铁, 2009, 44(1): 79-81, 86.
- CHEN Guanjin, HU Xiongguang, QIAN Kai, et al. Study of combustion technology of new top combustion BF stove[J]. Iron & Steel, 2009, 44(1): 79-81, 86.
- [4] 陈杉杉,国宏伟,张建良,等. 基于数值模拟的热风炉燃烧模型[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(5): 627-631.
- CHEN Shanshan, GUO Hongwei, ZHANG Jianliang, et al. Combustion model of a hot blast stove based on numerical simulation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(5): 627-631.
- [5] 张子蒙,章家岩,冯旭刚. 基于RBF神经网络整定的热风炉温控系统设计[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(6): 503-511.
- ZHANG Zimeng, ZHANG Jiayan, FENG Xugang. Design of hot blast stove temperature control system based on RBF neural network tuning[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(6): 503-511.
- [6] KIMURA Y, TAKATANI K, OTSU N. Three-dimensional mathematical modeling and designing of hot stove[J]. ISIJ International, 2010, 50(7): 1040-1047.
- [7] 司轶芳,于军琪. 非参数预估模糊自适应控制的研究[J]. 控制工程, 2013, 20(3): 404-407.
- SI Yifang, YU Junqi. Research on non-parametric predictive fuzzy adaptive control and method of engineer-

- ing application [J]. Control Engineering of China, 2013, 20(3): 404-407.
- [8] 林成城, 徐宏辉. 热风炉高风温新技术开发 [J]. 钢铁, 2005, 40(11): 9-12.
- LIN Chengcheng, XU Honghui. Development of new technology of increasing blast temperature [J]. Iron & Steel, 2005, 40(11): 9-12.
- [9] 邢东明, 李勇, 张秀华, 等. 热风炉高温区用硅砖中鳞石英的结构演变 [J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(12): 1818-1824.
- XING Dongming, LI Yong, ZHANG Xiuhua, et al. Structural evolution of tridymite in silica bricks used in high temperature zone of hot blast stove [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2019, 47(12): 1818-1824.
- [10] 窦克勤, 叶昊, 张海峰, 等. 基于主元分析的高炉异常炉况检测 [J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(12): 1862-1867, 1875.
- DOU Keqin, YE Hao, ZHANG Haifeng, et al. Detection of abnormal furnace conditions in blast furnace based on principal component analysis [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(12): 1862-1867, 1875.
- [11] 黄怡珉, 赵广播, 韩家德. 热风炉受热面壁温控制技术 [J]. 农业机械学报, 2003(1): 64-66.
- HUANG Yimin, ZHAO Guangbo, HAN Jiade. Research on the temperature control technology of the heating surface of the hot blast stove [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003 (1): 64-66.
- [12] 李德昀, 徐德刚, 桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制 [J/OL]. 控制与决策. [2020-09-20]. <http://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>.
- LI Deyun, XU Degang, GUI Weihua. Cooperative impedance control of dual manipulators based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller [J/OL]. Control and Decision. [2020-09-20]. <http://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>.
- [13] LIU S Q, CHEN Y, MA G Y. An adaptive fuzzy sliding mode controller for the depth control of an underactuated underwater vehicle [C]//2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 357-362.
- [14] 杨珍书, 毛奇, 窦立谦. 可重复使用飞行器再入姿态的区间二型自适应模糊滑模控制设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(4): 781-790.
- YANG Zhenshu, MAO Qi, DOU Liqian. Design of interval-two adaptive fuzzy sliding mode control for re-entry attitude of reusable aircraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(4): 781-790.
- [15] 滕宇. 高炉热风炉混杂系统建模与协调优化控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 15-32.
- [16] BESSA W M, OTTO S, KREUZER E, et al. An adaptive fuzzy sliding mode controller for uncertain underactuated mechanical systems [J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(9): 1521-1535.
- [17] 岳才成, 钱林方, 徐亚栋, 等. 基于指数趋近律链传动弹仓自适应模糊滑模控制 [J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(6): 750-756.
- YUE Caicheng, QIAN Linfang, XU Yadong, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for a chain driving shell magazine based on an exponential reaching law [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(6): 750-756.
- [18] 沈智鹏, 姜仲昊, 王国峰, 等. 风帆助航船舶运动的模糊自适应迭代滑模控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(5): 634-639.
- SHEN Zhipeng, JIANG Zhonghao, WANG Guofeng, et al. Fuzzy adaptive iterative sliding mode control of sail-aided ship motion [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(5): 634-639.
- [19] 蓝益鹏, 李洁. 直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制 [J/OL]. 控制与决策. [2020-11-08]. <http://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>.
- LAN Yipeng, LI Jie. Adaptive fuzzy sliding mode control of linear synchronous motor magnetic levitation system [J/OL]. Control and Decision. [2020-11-08]. <http://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>.
- [20] MOUSSAOUI S, BOULKROUNE A. Stable adaptive fuzzy sliding-mode controller for a class of underactuated dynamic systems [C]//ICEECA 2016: Recent Advances in Electrical Engineering and Control Applications. Belin, Germany: Springer, 2017: 114-124.

(编辑 杜秀杰 陶晴)