

转炉炉口微差压的模糊滑模控制系统设计

章家岩, 张子蒙, 冯旭刚

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 243032, 安徽马鞍山)

摘要: 针对转炉炉口微差压控制系统的非线性、干扰大和时变的特点,提出了一种基于干扰观测补偿的模糊滑模控制策略。通过分析滑模控制理论,得出了切换增益引起抖振这一结论。引入指数趋近律,发现切换增益与滑动因子绝对值呈正比关系。利用模糊设计规则对切换增益进行有效估计,使其更逼近滑模到达滑模面所需增益。结合基准观测器和经过处理所得到的等效干扰观测器,使得系统仅由增益就可对外界干扰进行快速反应。Matlab 仿真研究结果表明:采用模糊滑模控制比常规PID控制的响应时间减少了0.14 s,达到峰值时间减少了1.08 s,超调量相对减少了0.025%,系统的切换增益更小,有效地遏制了抖振现象。工程实际应用表明:应用所提方法后,系统的抖振相对于滑模控制降低了10%,调节时间相对常规PID控制降低了0.38 s,取压口处压力波动范围为 $-3.5 \sim 7$ Pa,比常规PID控制的效果提高了50%左右,系统抑制干扰的能力明显增强。

关键词: 转炉;微差压;模糊滑模;干扰观测器;常规PID控制

中图分类号: TP273.5 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202005019 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0142-07



OSID 码

Design of Fuzzy Sliding Mode Control System for Converter Furnace Differential Pressure

ZHANG Jiayan, ZHANG Zimeng, FENG Xugang

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'an Shan, Anhui 243032, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of non-linearity, large interference and time-varying of the differential pressure control system at converter mouth, a fuzzy sliding mode control strategy based on interference observation and compensation is proposed. Analyzing the sliding mode control theory, it is concluded that the switching gain induces buffet. The exponential approach law is introduced, and it is found that the switching gain is proportional to the absolute value of sliding factor. The fuzzy design rule is used to effectively estimate the switching gain for the gain to approach the value required by the sliding mode to reach the sliding mode surface. Combining the reference observer and the equivalent interference observer obtained after processing, the system can quickly respond to external interference only by gain. Matlab simulation results show that the fuzzy sliding mode control reduces the response time by 0.14 s, the peak time by 1.08 s, and the overshoot by 0.025%. The switching gain of the system is smaller, which effectively curbs the buffet phenomenon. A practical engineering case shows that once the proposed method is applied, the buffet of the system is reduced by 10% compared with sliding mode control, the adjustment time is reduced by 0.38 s compared with the conventional PID control, and the

收稿日期: 2019-11-19。 作者简介: 章家岩(1963—),男,教授,博士生导师。 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(KJ2018A0054,KJ2018A0060)。

网络出版时间: 2020-02-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200211.2033.008.html>

pressure fluctuation range at the take-out port is $-3.5\sim-7$ Pa. The effect of conventional PID control is increased by about 50%, and the ability of the system to suppress interference is significantly enhanced.

Keywords: converter; differential pressure; fuzzy sliding mode; disturbance observe; conventional PID control

转炉炼钢工艺中产生的转炉烟气含有大量 CO 和金属粉尘,特别在吹炼中期 CO 的含量会更高^[1-3]。CO 作为重要的二次化学能源,既是钢铁企业能源回收利用的重要突破口,又是实现国家节能减排的重要途径。对于整个企业而言,转炉煤气回收质量的提高,不但可以有效地降低成本、改善环境,而且可以逐步向“负能”炼钢方向发展^[4-6]。

在微差压控制方面,经典 PID 控制理论具备原理简单、鲁棒性好、适应性强等诸多优点,因此在工业现场得到了广泛运用。然而,部分复杂的工业现场对控制精度的要求比较高,实际工况易受外界干扰,造成控制量跳变等问题。由于经典 PID 控制的被控量的输出存在惯性,所以容易出现超调,这往往很难满足实际的需要。除经典 PID 控制外,文献[7]采用了滑模控制,由于其对系统的不确定性具有良好的抑制效果,因此应用在非线形控制场合的效果也是非常显著的。但是,由于系统存在惯性和状态测量误差等问题,所以性能变差,波形出现抖振,严重时甚至会失稳。文献[8]采用模糊控制,由于其在零点处存在盲点问题,若将其用于非线性系统的控制,会造成系统响应速度延长以及控制精度低,不能满足工程实际需要。

鉴于这些问题,本文以转炉炉口微差压为研究对象,采取滑模控制与模糊控制相结合的方式,有效地将两者的优点融合在一起,使得新系统既具有滑模控制响应速度快、鲁棒性好的特点,又具有模糊控制自适应能力强、实时在线校正参数的优点,对滑模控制中存在的抖振现象具有很强的削弱作用^[9-13]。

1 微差压控制系统构建

1.1 微差压控制的工艺分析

在转炉烟气回收工艺中,炉内压力 P_{Bl} 与外界大气压 P_0 存在两种关系:① $P_{\text{Bl}} > P_0$, 此时炉口会喷出高温烟气,造成环境污染;② $P_{\text{Bl}} < P_0$, 此时炉口会吸收过量氧气,使得 CO 燃烧而变成 CO_2 , 导致合格煤气回收量的降低。理想情况下,微差压控制在 ± 0 Pa, 但工程实践中炉口压力会受到诸多因素的影响,一般将其稳定在 ± 20 Pa 范围内即可。

转炉炉口微差压控制系统的原理是通过调节二文喉口的 P-A 挡板开度来实现炉口气体压力的控制。在转炉炼钢过程中,通过调节烟气和烟气流速,使得炉口烟罩内烟气压力与外界大气压的压差保持稳定,即可避免因烟气压力过大引起的烟气外溢,也可避免炉口因吸入过量空气而造成的合格煤气回收量的降低,从而起到较好的烟气回收效果。由此可知,P-A 挡板的工作性能对于炉口微差压在转炉烟气净化和煤气回收系统中起到了至关重要的作用。

1.2 微差压控制的原理及思路

在转炉炼钢过程中,P-A 挡板具有典型的非线性和滞后等特性,是炼钢及转炉煤气回收的关键环节,受到液压伺服系统的控制^[14]。在炼钢过程中,通常是调节挡板开度将炉口微差压的波动维持在很小范围内。由于风机的转速忽高忽低、炼钢的节奏忽快忽慢,所以烟气量一直在变动,往往很难实现对 P-A 挡板的精确控制。

在我国冶金行业中,一旦遇到风机负载发生骤变或者烟气量发生较大改变等突发情况,经常需要经验丰富的操作员根据炉口火焰及烟气量来手动调节 P-A 挡板的开度。该调节方法受人为因素影响较大,很难满足现代工业自动化控制的需要,因此本文采用基于干扰观测补偿的模糊滑模微差压控制。该方法能方便地解决工业领域中常见的强耦合、非线性、时变性、大惯性等复杂问题,而且响应速度快、自适应能力强。

炉口微差压自动调节原理如图 1 所示。微差压变送器从输出端的烟道尾气中取出压力 P_V , 该信号经过处理后以 $4\sim 20$ mA 的标准电信号 D_V 传送到输入端。 D_V 被送到控制柜的集散控制系统(DCS)中,与设定值 S_V 比较产生偏差信号 ΔE , 送入调节器。 ΔE 在调节器中被转换成 $4\sim 20$ mA 电信号 M_V , 该信号经过本文设计的模糊滑模控制器的调节和补偿器的非线性补偿后,作为内环控制回路的输入信号。该信号与内环控制回路的二文喉口 P-A 挡板反馈的信号进行比较,由位于液位伺服装置中的伺服放大器将差值信放大到 $0\sim \pm 200$ mA。放

大的信号转化为液压信号,液位伺服装置依据液压信号推动二文喉口 P-A 挡板的开度发生改变,从而保证炉内烟气压力和外界大气压保持稳定的压差^[5]。

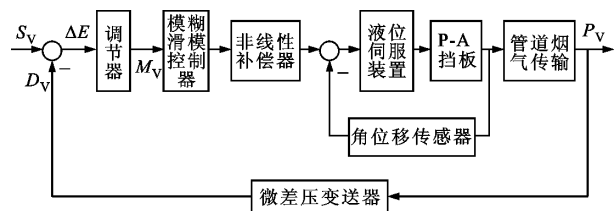


图1 炉口微差压自动调节原理

2 模糊滑模控制器的设计

通过滑模控制策略对不连续系统的状态变量进行约束,使其沿预定状态轨迹做小幅、高频的运动即为滑模运动^[15]。理想状态下,控制量不受其他变量约束,且系统状态测量无误差,那么滑模运行轨迹肯定很光滑且会逐步稳定于原点,系统不会产生任何抖振。但是,在实际情况下,受到控制量的限制、系统切换开关的惯性以及状态检测误差的影响,滑模运行轨迹会沿着切换面来回跳动,产生抖振。为了有效削弱抖振,本文采取依据干扰大小调节切换项的控制策略,即:外界干扰大时,提高切换项;外界干扰小时,降低切换项。

转炉炉口微差压控制系统的动态特性可以用含未知输入的动态状态方程描述,即

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{G}d(t) \\ y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u \in \mathbf{R}$ 为系统控制输入,代表滑模控制器的控制律; $\mathbf{x} = [x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n-1)}] \in \mathbf{R}^n$ 为状态变量; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{G}$ 为适当维数的矩阵,代表对控制系统的影响系数或影响因子的权值, $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{C}$ 可观测; $y \in \mathbf{R}$ 为控制输出,代表炉口取压口处压力;连续函数 $d(t) \in \mathbf{R}^m$ 为非线性函数,代表不确定的未知干扰,满足 $|d(t)| \leq D_{\max}$,其估计值表示为 $\hat{d}(t)$ 。

控制目标是确定状态反馈 $u = u(\mathbf{x})$,使闭环系统的状态变量达到期望 $\mathbf{x}_d = [x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d, \dots, x_d^{(n-1)}]^T$ 。

定义跟踪误差为

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d = [e, \dot{e}, \ddot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T \quad (2)$$

对方程(1)取切换函数,得到

$$S(\mathbf{x}, t) = \mathbf{c}\mathbf{e} = c_1 e + c_2 \dot{e} + \dots + c_{(n-1)} e^{(n-2)} + e^{(n-1)} \quad (3)$$

式中: $S(\mathbf{x}, t)$ 为滑模超曲面;常数 $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_{(n-1)}, 1]$ 。在满足 $\lambda^{n-1} + c_{(n-1)}\lambda^{n-2} + \dots + c_2\lambda + c_1$ 是 Hurwitz 多项式时,滑模超曲面为

$$S(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (4)$$

设计控制律 u ,使闭环系统满足滑动模态条件

$$\dot{s} \leq -\eta |s|, \quad \eta > 0 \quad (5)$$

式中 s 为滑动因子。

采用常规滑模控制器,取控制律为

$$u = Z^{-1}(-\mathbf{c}\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{x}}_d - K\text{sgn}(s)) \quad (6)$$

$$K = \eta + M \quad (7)$$

$$Z = \mathbf{c}\mathbf{B} \quad (8)$$

$$M = \mathbf{c}\mathbf{G}D_{\max} \quad (9)$$

由式(2)~(9)不难证明滑模条件 $\dot{s} \leq -\eta |s|$ 。由滑模控制律式(6)可以看出,抖振的产生是由切换增益 K 引起的。不难发现, K 不仅要满足滑模存在的条件,还要满足补偿不确定度 M 的要求。如果 M 随时间变化,为了削弱抖振,则 K 也要随之调整。

引入指数趋近律 $\dot{s} = -\epsilon \text{sgn}(s) - \delta s$,其中 $\epsilon > 0, \delta > 0$,代入滑模条件式(5),可得

$$\eta \geq \epsilon + \delta s, \quad s > 0 \quad (10)$$

$$\eta \leq \epsilon - \delta s, \quad s < 0 \quad (11)$$

式(10)(11)可表示为 $\eta = \epsilon + \delta |s|$ 。 K 可表示为

$$K = \begin{cases} Y + \epsilon + \delta s, & s > 0 \\ Y + \epsilon - \delta s, & s < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$Y = \mathbf{c}\mathbf{G}\Delta D \quad (13)$$

由式(7)~(13)可见:当 $|s|$ 变大时, K 较大;当 $|s|$ 变小时, K 较小;当在滑模面上时, K 趋于稳定。本文采用模糊控制规则,依据工程实践经验实现 K 的变化。

下面对切换增益 K 进行模糊规则设计。已知该系统滑模存在条件为 $s\dot{s} < 0$,当系统运行至滑模面时,此后将会一直维持在滑模面上。由式(6)可见,增益 K 既要确保系统得以运行到滑模面,又要保证滑模存在条件成立。设计的模糊控制规则有两条:①如果 $s\dot{s} > 0$,则 K 应增大;②如果 $s\dot{s} < 0$,则 K 应减小。

通过这两条控制规则设计关于 $s\dot{s}$ 和 ΔK 之间模糊关系的系统。在该系统中,令 $s\dot{s}$ 的模糊集为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{ZO}, \text{PM}, \text{PB}\}$,作为模糊控制器的输入, ΔK 的模糊集为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{ZO}, \text{PM}, \text{PB}\}$,作为模糊控制器的输出,其中 NB 为负大, NM 为负中, ZO 为 0, PM 为正中, PB 为正大^[16]。模糊规则设计为: ΔK 保持与 $s\dot{s}$ 相同。

采用积分的方法对 $\hat{K}$ 进行估计,即

$$\hat{K} = M_1 \int_0^t \Delta K dt \quad (14)$$

式中 M_1 为比例系数,根据经验确定。

式(1)中 $d(t)$ 为未知输入扰动,具有非线性和时变性。由于滑模控制精度低,难以实现精确控制,因此引入了模糊规则来对切换增益进行有效估计,从而满足了实际需要,使得输出 $\hat{K}$ 逼近滑模,达到滑模面要求的增益 K 。

用 $\hat{K}$ 替代(6)式中的 K ,则控制律变为

$$u = Z^{-1} \left[-c\mathbf{A}\mathbf{x} + c\dot{\mathbf{x}}_d - \left(M_1 \int_0^t \Delta K dt \right) \text{sgns} \right] \quad (15)$$

3 干扰观测器设计

干扰观测器设计步骤如下:假设外界干扰可以用示波器或其他电子器件测量出来,设计满足期望控制性能的基准控制器;利用基础理论分析和数据处理来设计具备干扰估计的观测器;将基准控制器与干扰估计的观测器有效地结合在一起,达到在反向通道中补偿扰动的目的。本文以一阶系统作为控制对象,研究干扰观测器的设计过程^[17-21]。将式(6)作为基准控制器的控制律。

为了便于分析,假设干扰对系统状态输入信号的影响来自同一个通道,由此复合控制律可设计为

$$u^* = u + \hat{d} = Z^{-1}(-c\mathbf{A}\mathbf{x} + c\dot{\mathbf{x}}_d - K\text{sgns}) + \hat{d} \quad (16)$$

由于控制器和干扰观测器的设计是相互独立的,因此该观测器与其他控制方法结合的能力很强,这不仅对干扰观测器的设计提供了很大的便利,而且设计方法也灵活,系统抗干扰能力也明显提升。假设系统干扰变化缓慢,可令

$$\dot{\hat{d}} = 0 \quad (17)$$

那么观测误差可表示为

$$e_d = \hat{d} - d \quad (18)$$

由式(1)可得

$$\mathbf{G}\dot{d} = \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}u \quad (19)$$

构建扰动观测器为

$$\dot{\hat{d}} = -\mathbf{L}\mathbf{G}(\hat{d} - d) = -\mathbf{L}\mathbf{G}\hat{d} + \mathbf{L}(\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}u) \quad (20)$$

式中 $\mathbf{L}$ 表示干扰估计的系数。由于式(20)中存在微分信号,而在工程实际应用中微分信号一般很难获取,因此对式(20)做变换,即

$$\dot{\hat{d}} - \mathbf{L}\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L}\mathbf{G}\hat{d} - \mathbf{L}(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u) \quad (21)$$

定义中间变量 $\mathbf{z} = \hat{d} - \mathbf{L}\mathbf{x}$,则等效后的干扰观测器为

$$\dot{\mathbf{z}} = -\mathbf{L}\mathbf{G}(\mathbf{z} + \mathbf{L}\mathbf{x}) - \mathbf{L}(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u) =$$

$$-\mathbf{L}(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{G}\mathbf{z} + \mathbf{L}\mathbf{G}\mathbf{x}) \quad (22)$$

$$\dot{\hat{d}} = \mathbf{z} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{x}} \quad (23)$$

从式(23)发现,该干扰观测器不存在微分信号,极大地减轻了运算处理量。在响应速度方面,只要调节一个合适的增益,系统就能够对外界干扰进行快速反应,同时该控制器也提高了系统的抗干扰能力,较好地满足了工程实际应用要求。

4 系统的控制策略仿真

采用 Matlab 软件进行仿真。仿真的微差压控制对象为

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= -0.09X_1 - 0.224X_2 + 0.188u + d(t) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

该控制系统仿真模型根据各因素对炉口微差压的影响程度,通过数学分析、回归以及加权处理得到微差压模型仿真系统的系数。对系统施加的正弦干扰信号为 $d(t) = 4.5 + 0.5\sin(2\pi t)$,系统的初始状态为 $(0.15, 0)$, $D_{\max} = 5$ 。

(1)常规的滑模控制器仿真。采用控制律式(15),控制增益可表示为

$$K = \begin{cases} M + \epsilon + \delta s, & s > 0 \\ M + \epsilon - \delta s, & s < 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\epsilon = 0.6$; $\delta = 18$ 。图2为常规滑模控制的相轨迹,图3为常规滑模控制的控制输入和误差状态响应曲线。

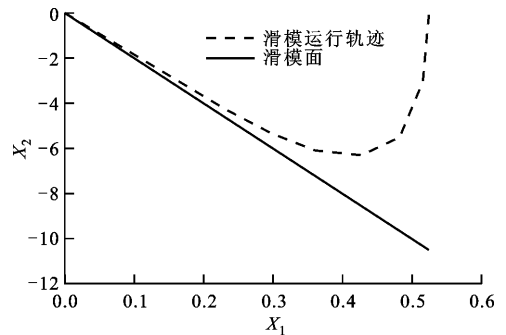


图2 常规滑模控制的相轨迹

(2)带有干扰观测补偿的模糊滑模控制器仿真。采用干扰观测补偿法,为对象设计改进的PID观测器为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{X}}_1 &= \hat{X}_2 \\ \dot{\hat{X}}_2 &= -0.09\hat{X}_1 - 0.224\hat{X}_2 + 0.188u + \hat{d} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式中 $\hat{X}_1$ 、 $\hat{X}_2$ 为观测状态。若干扰观测器采用极点

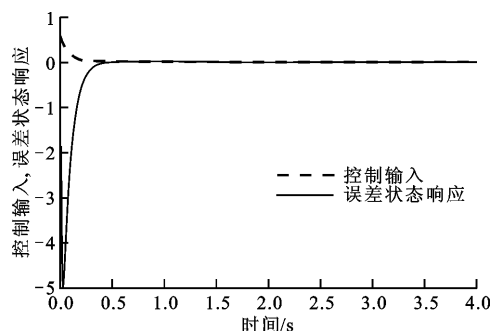


图3 常规滑模控制的控制输入和误差状态响应

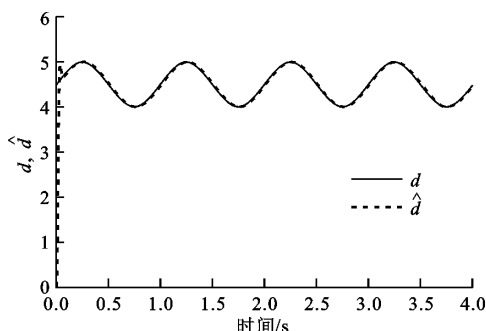


图6 干扰观测结果

配置,同时取 $\Delta D=0.2$,则优化后的控制增益可表示为

$$K = \begin{cases} Y + \epsilon + \delta s, & s > 0 \\ Y + \epsilon - \delta s, & s < 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\epsilon=3.5$; $\delta=18$ 。图4为含干扰观测器的相轨迹,图5为含干扰观测补偿的模糊滑模控制的控制输入和误差状态响应,图6为干扰观测结果。

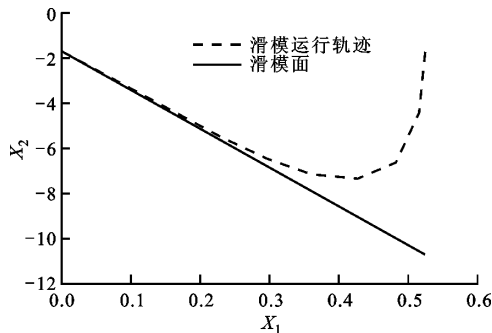


图4 含干扰观测器的相轨迹

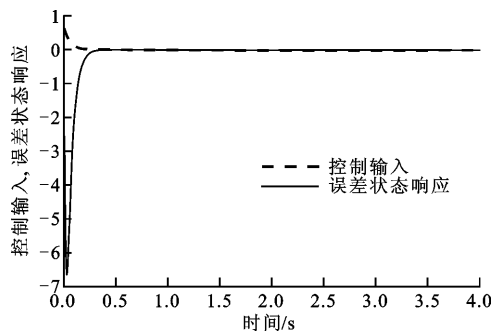


图5 含干扰观测补偿的模糊滑模控制的控制输入和误差状态响应

从图2可以看出,在常规滑模控制方法下,滑模运动到滑模面的路程较长,从滑模面上运行到平衡点的路程较短。系统一旦进入到滑模面上运行,在一定条件下对外界干扰及参数扰动具有较强的鲁棒性和抗干扰性,本文选择在原系统中加入干扰观测器来进一步增强。从图4可以看出,加入干扰观测器系统的滑模相轨迹曲线在滑模面上运行的距离明

显增加,新系统的抗干扰能力明显增强。

从图3和图5可以看出,含干扰观测补偿的模糊滑模控制的误差响应时间比常规滑模控制的减少了0.14 s。从图6可以看出,采用模糊滑模干扰补偿控制后,系统超调量为0.048%,比常规滑模控制的减少了0.025%,达到峰值时间比常规滑模控制的减少了1.08 s,稳态误差为0.021 8%,显然系统的切换增益更小,抖振现象得到有效遏制,系统性能得到改善。

5 工程应用

为了验证干扰观测补偿的炉口微差压模糊滑模控制系统的有效性,在2019年8月5日,将该控制系统应用到某钢铁企业自备电厂150 t燃气锅炉中。锅炉采用浙大中控DCS,该系统既可以完成对数据的采集、设备的控制,还可以实现对工艺流程和重要参数的监视和报警。燃烧优化控制系统组成如图7所示,可以看出,在工程实际控制现场,承担信息采集的传感器、用于数据监控的显示器、担负信息处理的调节阀和变送器等,通过现场总线连接到变送器和中间处理器,工业现场的工控机和信息传输的中间环节通过工业以太网与优化控制器和远程控制器以OPC协议的方式进行连接,并完成信息传输工作。

转炉微差压系统原先采用常规的PID控制。系统稳定前,改变切换增益和积分环节,曲线振荡变缓,与设定值的偏差逐渐减小,加入微分环节后,曲线振荡频率变化,逐渐趋近于稳定。系统稳定后的曲线如图8所示,可以看出,曲线波动很大,波动范围为 $-9 \sim 13.5$ Pa。这是因为常规PID控制下出现较大扰动时,系统由于存在惯性无法及时抑制压力的变化,因此微差压变化幅度很大,抗干扰能力很弱。采用模糊滑模控制的曲线如图9所示,可以看出:系统的抖振相对于滑模控制的降低了10%,调

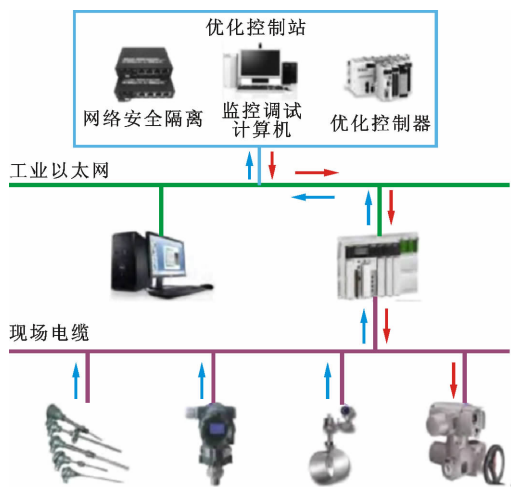


图7 燃烧优化控制系统组成

节时间相对常规 PID 控制的缩短了 0.38 s,超调量也得到了很大的改善;通过采用模糊滑模控制,系统的性能明显提高,波动范围为 $-3.5 \sim 7$ Pa,取压口处压力的变化比较平缓,没有出现较高的波峰和波谷,抑制干扰的能力明显增强,比常规 PID 控制的效果提高 50%左右,转炉炉口微差压控制系统的性能更加稳定。

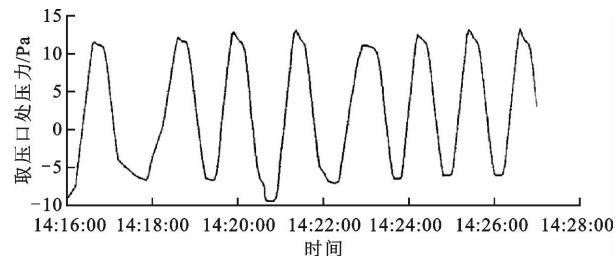


图8 常规 PID 控制的曲线

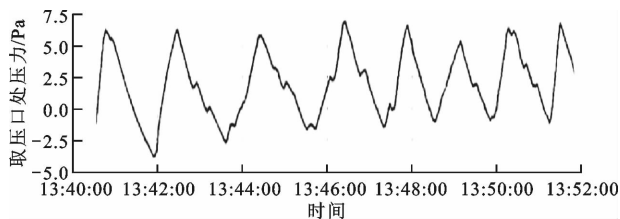


图9 模糊滑模控制的曲线

6 结论

转炉炼钢工艺在吹炉中期会产生大量 CO 气体,气体经炉口遇冷空气转变为煤气释放到空气中,造成化石燃料的浪费和环境的污染,因此本文提出了一种基于干扰观测补偿的模糊滑模控制策略,使转炉炉口压力在很小的范围内波动,从而降低转炉向大气中排放的烟尘和废气。通过分析滑模控制理论,得到抖振是由切换增益引起的这一结论。引入

指数趋近率,找到切换增益与 $|s|$ 的联系。对切换增益进行模糊规则设计,使其满足滑模到达滑模面所需的增益。通过设计干扰观测器,提高系统的抗干扰能力,简化响应速度的控制。

仿真结果表明:含干扰观测器的滑模相轨迹曲线比常规滑模相轨迹曲线在滑模面上运行的距离增加,系统的鲁棒性和抗干扰性明显增强;模糊滑模控制的误差响应时间更短,超调量比常规滑模控制器的减少了 0.025%,达到峰值的时间和稳态误差都比较小,特别是切换增益的减小使得系统的抖振得到了有效改善。

工程应用表明:常规 PID 控制下系统存在惯性,无法及时抑制干扰,导致取压口处压力波动范围很大;采用含干扰观测补偿的模糊滑模控制后,炉口微差压控制系统的性能更加稳定,取压口处压力变化较平缓,且没有出现较明显的波峰与波谷,系统的抗干扰能力明显增强。

参考文献:

- [1] 周建安, 蒋学凯, 谢剑波, 等. 转炉高温烟气喷吹煤粉回收煤气工业试验研究 [J]. 炼钢, 2017, 33(6): 67-72.
ZHOU Jian'an, JIANG Xuekai, XIE Jianbo, et al. Industrial testing of high quality converter gas recovery by injecting pulverized coal into the high temperature gas of converter [J]. Steelmaking, 2017, 33(6): 67-72.
- [2] 卢秀和, 王蔚, 李宏侠. 基于 10 t 矿热炉的煤气净化回收微差压控制系统 [J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(5): 548-552.
LU Xiuhe, WANG Wei, LI Hongxia. Micro-differential pressure control system for gas purification and recovery based on 10 t submerged arc furnace [J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 33(5): 548-552.
- [3] 章家岩, 马中海, 钱晓斌, 等. 转炉煤气回收系统优化控制策略应用 [J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 1017-1024.
ZHANG Jiayan, MA Zhonghai, QIAN Xiaobin, et al. Application of optimized control strategy for converter gas recovery system [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(6): 1017-1024.
- [4] 陈媛, 王爽, 张鹏. 转炉煤气净化回收“塔-环隙”技术在日钢的应用 [J]. 环境工程, 2014, 32(1): 144-146, 157.
CHEN Yuan, WANG Shuang, ZHANG Peng. Appli-

- cation of “tower-RSW” technology for converter gas recovery in Rizhao Steel Co., Ltd. [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(1): 144-146, 157.
- [5] 刘荫绵. 炉口微差压技术在转炉煤气回收中的应用[J]. 钢铁, 1994(5): 60-62, 16.
LIU Yinmian. Application of the micro differential pressure technology in converter gas recovery [J]. Iron & Steel, 1994(5): 60-62, 16.
- [6] 上官方钦, 干磊, 周继程, 等. 钢铁工业副产煤气资源利用分析及案例[J]. 钢铁, 2019, 54(7): 114-120.
SHANGGUAN Fangqin, GAN Lei, ZHOU Jicheng, et al. Analysis and case of the utilization of by-product gas resources in the iron and steel industry [J]. Iron & Steel, 2019, 54(7): 114-120.
- [7] 李逃昌. 基于新型趋近律的非线性积分滑模控制方法[J]. 控制工程, 2019, 26(11): 2031-2035.
LI Taochang. Nonlinear integral sliding mode control method based on new reaching law [J]. Control Engineering of China, 2019, 26(11): 2031-2035.
- [8] 杨子豪, 张燕平, 高伟. 基于给水温度前馈的中间点焓值模糊控制系统[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 62-68.
YANG Zihao, ZHANG Yanping, GAO Wei. An intermediate point threshold fuzzy control system based on feedwater temperature feedforward [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 62-68.
- [9] 杜亚雯, 董全林, 蒲小琴, 等. 基于模糊滑模的激光导引头伺服控制系统仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S2): 37-43.
DU Yawen, DONG Quanlin, PU Xiaoqin, et al. Simulation analysis of laser seeker servo control system based on fuzzy sliding mode [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(S2): 37-43.
- [10] 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. [2019-10-01]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>.
LAN Yipeng, LI Jie. Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor [J/OL]. Control and Decision. [2019-10-01]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>.
- [11] 毛君, 曹昊, 谢苗, 等. 刮板输送机链条张力模糊滑模变结构控制研究[J]. 控制工程, 2018, 25(11): 2041-2045.
MAO Jun, CAO Hao, XIE Miao, et al. Study on variable structure control of sliding conveyor chain tension fuzzy sliding mode [J]. Control Engineering, 2018, 25(11): 2041-2045.
- [12] 韩吉霞, 马飞越, 佃松宜, 等. 基于非线性干扰观测器不确定系统的终端滑模控制[J/OL]. 光电与控制. [2019-10-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.tn.20191014.1418.014.html>.
HAN Jixia, MA Feiyue, DIAN Songyi, et al. Terminal sliding mode control for uncertain systems based on nonlinear disturbance observer [J/OL]. Electronics Optics & Control. [2019-10-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.tn.20191014.1418.014.html>.
- [13] 汤亮, 卢文政, 龚发云, 等. 滚珠丝杠副的增益模糊自适应双幂次滑模趋近率控制[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 143-152.
TANG Liang, LU Wenzheng, GONG Fayun, et al. Gain fuzzy adaptive in double power reaching law for sliding mode control of ball screw pair [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 143-152.
- [14] 马荣芳, 孙弘, 尹凤. 转炉烟气净化及煤气回收系统中炉口微差压的自动控制[J]. 电气传动, 2006(5): 53-55.
MA Rongfang, SUN Hong, YIN Feng. Automatic control of micro-differential pressure of furnace in converter flue gas purification and gas recovery system [J]. Electric Drive, 2006(5): 53-55.
- [15] 章家岩, 郎佳红, 王金忠. 转炉炉口微差压滑模变结构控制技术[J]. 控制工程, 2009, 16(4): 419-422.
ZHANG Jiayan, LANG Jiahong, WANG Jinzhong. Control technology of differential pressure sliding mode change structure in converter furnace [J]. Control Engineering, 2009, 16(4): 419-422.
- [16] 陈李济, 应保胜, 马强, 等. 基于变论域模糊滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(11): 51-54.
CHEN Liji, YING Baosheng, MA Qiang, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on variable universe fuzzy sliding mode observer [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(11): 51-54.
- [17] 吴阳, 张建成. 同时含有未知输入和测量干扰系统全维和降维观测器设计[J/OL]. 自动化学报. [2019-10-01]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190505>.
WU Yang, ZHANG Jiancheng. Full- and reduced-order observer design for systems with both the unknown input and measurement disturbance [J/OL]. Acta Automatica Sinica. [2019-10-01]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190505>.

(下转第 157 页)

- [19] LEMPITSKY V, ZISSERMAN A. Learning to count objects in images [C]//Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems. Vancouver, Canada; NIPS, 2010: 1324-1332.
- [20] JOSEPH R, SANTOSH D, ROSS G. You only look once: unified, real-time object detection [C]// Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2016: 779-788.
- [21] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger [C]// Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2017: 7263-7271.
- [22] CHEN L C, ZHU Y, PAPANDREOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation [C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). Berlin, Germany; Springer, 2018: 801-818.
- [23] 张焯林, 赵建伟, 曹飞龙. 构建带空洞卷积的深度神经网络重建高分辨率图像 [J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(3): 259-267.
- ZHANG Zhuolin, ZHAO Jianwei, CAO Feilong. Building deep neural networks with dilated convolutions to reconstruct high-resolution image [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 32(3): 259-267.
- [24] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1904-1916.
- [25] 时增林, 叶阳东, 吴云鹏, 等. 基于序的空间金字塔池化网络的人群计数方法 [J]. 自动化学报, 2016, 42(6): 866-874.
- SHI Zenglin, YE Yangdong, WU Yunpeng, et al. Crowd counting using rank-based spatial pyramid pooling network [J]. Journal of Automation, 2016, 42(6): 866-874.
- [26] SINDAGI V A, PATEL V M. A survey of recent advances in CNN-based single image crowd counting and density estimation [J]. Pattern Recognition Letters, 2018, 107: 3-16.

(编辑 陶晴)

(上接第148页)

- [18] 文新宇, 王子豪, 王宝光, 等. 一种反向递推正弦干扰观测器的设计方法 [J/OL]. 控制与决策. [2019-10-01]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0769>.
- WEN Xinyu, WANG Zihao, WANG Baoguang, et al. Design method of reverse recursive sinusoidal disturbance observer [J/OL]. Control and Decision. [2019-10-01]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0769>.
- [19] 韩乃玉, 李志刚. 基于干扰观测器的弹仓趋近自适应滑模控制 [J/OL]. 兵器装备工程学报. [2019-10-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1213.TJ.20190910.1512.020.html>.
- HAN Naiyu, LI Zhigang. Approach adaptive sliding mode control of magazine based on disturbance observer [J/OL]. Journal of Ordnance Equipment Engineering. [2019-10-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1213.TJ.20190910.1512.020.html>.
- [20] 王东委, 富月. 基于高阶观测器和干扰补偿控制的模型预测控制方法 [J/OL]. 自动化学报. [2019-10-01]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c180697>.
- WANG Dongwei, FU Yue. Model predict control method based on higher-order observer and disturbance compensation control [J/OL]. Acta Automatica Sinica. [2019-10-01]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c180697>.
- [21] 贺同福, 吴忠. 基于复合干扰观测器的CMG框架系统高精度转速控制 [J]. 系统科学与数学, 2019, 39(4): 495-506.
- HE Tongfu, WU Zhong. High-precision speed control of CMG frame system based on compound disturbance observer [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences 2019, 39(4): 495-506.

(编辑 陶晴)