

基于平滑切换策略的焦炉集气管压力变结构控制^①

周国雄^{②*} 雷 琪^{**}

(* 中南林业科技大学计算机与信息工程学院 长沙 410004)

(** 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘 要 针对基于专家切换策略的焦炉集气管压力变结构控制方法具有动态切换特性差的缺点和集气管压力在不同工况切换时容易导致压力出现振荡和超调的现象,提出了一种基于平滑切换策略的集气管压力变结构控制方法。该方法根据集气管分管压力在不同工况下具有的动态特性,选用基于满意聚类的 T-S 模糊模型建立相应的动态子模型,并采用相应的模糊子控制器进行控制。为保证子模型切换过程状态轨迹的平滑性,采用监督级控制器动态切换子模型及相应的子控制器。仿真和实际效果说明了该算法的有效性。

关键词 平滑切换, T-S 模糊模型, 变结构控制, 集气管压力

0 引 言

焦炉集气管压力是影响焦炭质量、煤气产量和焦炉寿命的一个重要控制指标。在一般生产控制中,常采用建立控制对象的数学模型来实现有效控制,然而焦炉集气管压力系统是一个耦合严重、扰动变化剧烈,且具有严重非线性、时变性的幅值大的多变量系统,常规控制方法难以满足工艺要求^[1,2]。国内多家钢铁公司和高校针对小型号的焦炉深入进行了集气管压力控制方法的研究^[3-9],较好地解决了焦炉煤气产量小、集气管压力波动小的情况,但是对焦炉煤气产量高、压力波动大的情况,控制能力受到了极大的限制。随着钢铁产量的提高,焦炉也由小型焦炉向着大型焦炉方向发展,煤气产量的提高进而更容易引起集气管压力的波动,因而集气管压力的控制问题亟需解决。针对此情况,文献[10]提出一种变结构模糊控制算法,根据此算法,针对集气管压力的不同波动范围,通过采用不同的控制规则以及量化因子设计了两个模糊控制器,从而系统在一定程度上保证了集气管压力稳定在工艺给定范围内。在该控制过程中,模糊控制器的切换仅采用专家规则选择切换,虽然系统最终输出能满足一定的控制要求,但切换过程动态性能很差。因此,本文在

文献[10]的基础上,提出一种基于多模型平滑切换策略的集气管压力变结构控制方法。

1 工艺分析

某钢铁公司焦化厂有 1#、2#、新 2#(简称 N2#)三座焦炉。文献[10]证明并分析了该公司的 N2#焦炉可以单独进行控制,但由于其煤气产量高,且与其它两座焦炉呈不对称分布,造成控制效果不好。笔者曾尝试采用文献[3-9]中的模糊控制算法,但是由于 N2#焦炉的独有特性,单一的模糊控制会造成集气管压力振动较大,且很难稳定在给定值 $\pm 20\text{Pa}$,因而提出了文献[10]的控制算法,图 1 显示出了采用变结构模糊控制后 N2#焦炉集气管压力的一段异常数据曲线。该文中,给定值 $\pm 40\text{Pa}$ 内为模糊控制器 1 区,给定值 $\pm 40\text{Pa}$ 外为模糊控制器 2 区。从图 1 中看出,在 101 ~ 160s,当集气管压力受到外界干扰时,集气管压力从模糊控制器 1 往模糊控制器区 2 进行切换,此时切换策略是采用专家控制算法对模糊控制器进行切换,造成压力在给定值 $+40\text{Pa}$ 范围内有一段时间的滞留,降低了控制品质。因此本文提出了一种多模型平滑切换策略的集气管压力变结构控制,即当系统需要切换时,先将切入的控制器和相应模型以及实际被控对象的输入输出优化成一

① 863 计划(2006AA04Z172)和中南林业科技大学人才引进项目(104-0219)资助。

② 男,1980 年生,博士;研究方向:复杂工业过程的控制技术及应用;联系人,E-mail: zhougx01@163.com
(收稿日期:2010-11-02)

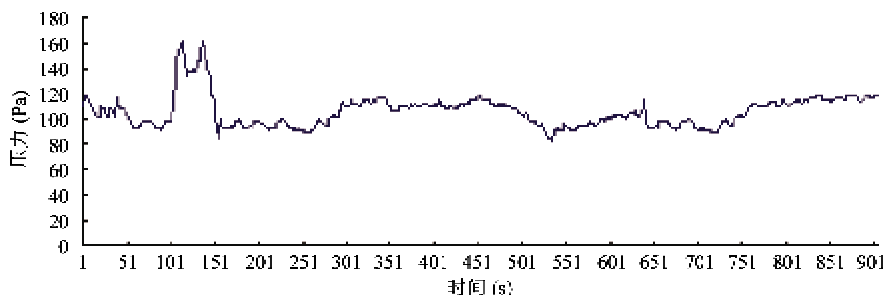


图1 N2#焦炉集气管压力数据曲线(压力给定值为100Pa)

个能使系统输出满足控制要求的控制量,将此控制量和即将切入的控制器切入实际系统,实现模型的平稳切换。

2 基于满意聚类的 T-S 模糊模型

由于 N2#集气管压力系统具有高度的非线性、时变性与不确定性,而且集气管压力易受到外送压力、初冷器吸力、蝶阀开度的影响,造成 N2#集气管压力波动大、干扰严重,如何描述这种复杂过程的非线性动态特性就成了建模的关键^[11-13]。Takagi 和 Sugeno 提出的 Takagi-Sugeno (T-S) 模糊模型,本质上是一种非线性模型,易于表达复杂系统的动态特性,可以任意精确地逼近任意非线性系统,因而本文选用 T-S 模糊模型^[14,15]来描述 N2#集气管压力的复杂动态特性是合适的。

N2#集气管压力过程可以看作一个多输入多输出的系统,样本集由系统的外送压力、初冷器吸力、蝶阀开度、N2#集气管压力数据组成,根据 N2#焦炉工况特点,需要建立 2 个 T-S 模型。假设其样本表示 (ϕ_j, y_j) , $j = 1, 2, \dots, N$, ϕ_j 表示影响系统输出的递推向量, y_j 是系统输出。定义 $z_j = [\phi_j, y_j]^T$, 则样本集可表示为 $Z = [z_1, z_2, \dots, z_N]$, 其中 $z_j \in R^{d+1}$ 。焦炉集气管压力过程参数的样本集 Z 通过满意聚类 G-K 算法被划分为 c 个聚类(结合焦炉集气管压力的特点,此处聚类个数 $c = 2$), 则通过后件辨识,系统可由 c 个子模型 $\{M_1, M_2, \dots, M_c\}$ 表征。然后通过计算各子模型的隶属度,全局系统模型可利用局部模型间的模糊加权组合求出。

焦炉集气管压力过程是复杂的工业过程,聚类边界不是很清晰,适合于采用满意聚类算法。该方法通过聚类协方差矩阵采用自适应的距离度量进行模糊聚类,不需要重新初始化聚类中心,计算量小,性能指标递减速度快,是解决基于多模型的有效辨识和控制手段。对于 N2#焦炉集气管压力, G-K 算

法的目标是通过求取目标函数获得集气管压力过程参数样本的隶属度矩阵 $U = [\mu_{ij}]_{c \times N}$ 和聚类中心 $V = [v_1, v_2, \dots, v_c]$ 。

对于 N2#集气管压力过程,针对 G-K 聚类后的每个子集,采用最小二乘正交参数辨识集气管压力各子模型参数,该算法借助 G-K 算法中生成的隶属度矩阵可以方便地得出参数集 θ , 最后,根据模糊推理规则,焦炉集气管压力模糊系统的全局模型输出为

$$\begin{aligned} y(k) &= \sum_{j=1}^M (p_0^j + p_1^j x_1 + \dots + p_n^j x_n) \phi(z, c_j, \sigma_j) \\ &= \sum_{j=1}^M L_j(x) \phi(z, c_j, \sigma_j) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, c_j 和 σ_j 分别为前提模糊集合隶属度函数的中心点和宽度。 $L_j(x)$ 为第 j 个线性子系统模型, $\phi(z, c_j, \sigma_j)$ 为模糊基函数:

$$\begin{cases} \phi(z, c_j, \sigma_j) = \frac{\mu_j}{\sum_{i=1}^M \mu_i} \\ \mu_i = \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z_1 - c_{i,1})^2}{\sigma_{i,1}^2}\right] \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z_2 - c_{i,2})^2}{\sigma_{i,2}^2}\right] \\ \dots \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z_{n_2} - c_{i,n_2})^2}{\sigma_{i,n_2}^2}\right] \end{cases} \quad (2)$$

考虑到 N2#集气管压力工况的特点,本文采用基于满意聚类的 T-S 模型的方法建立 2 个集气管压力模型,然后采用文献[10]的变结构模糊控制器对其进行控制。

3 多模型方法的平滑切换

在工业控制过程中,不同的生产条件下的模型结构或参数往往不同,该过程控制模型可视为多模型系统。从图 1 中可以看出,由于文献[10]的控制方法仅采用简单的专家控制策略选择模糊控制器,

会导致集气管压力从一种工况转变到另一种工况而发生振荡。基于文献[10],本文对N2#集气管压力采用基于多模型平滑切换的变结构控制方法。为达到控制器的平滑切换,文中子模型及控制器的选择是通过一个监督级控制器来完成的。其中监督级控制器可以是计算机或者是操作者本身,它根据系统的状态、环境变量、控制目标、代价函数指标等给出切换命令,使子模型以及相应的子控制器根据它所给出的命令在正确的时间向正确的方向切换,以保证系统在多个局部模型切换过程的平滑性。

假设通过模糊T-S建模得到以下高阶模型,其状态方程表示如下:

监督级切换规则 i :

If $z_1(t)$ is N_{1i} and $\dots$ and $z_p(t)$ is N_{pi} Then

子模型 i : $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t)$; 子控制器 i : $u_i(t) = -F_i x(t)$

其中: $i = 1, 2, \dots, s$; $z_k(t)$ ($k = 1, 2, \dots, p$) 可以是状态变量,也可以是环境变量或者操作命令等; N_{ki} 为模糊工作域分化变量; $u(t)$ 为控制器输出。那么第 i 个子模型状态方程可以写成:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s p_i(z(t)) w_j(z(t)) \\ &= [A_i - B_i F_j] x(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} p_i(z(t)) &= N_{ki}(z_k(t)) / \sum_{k=1}^s N_{ki}(z_k(t)), \\ k &= 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (4)$$

$$p_i(z(t)) \geq 0; \sum_{i=1}^s p_i(z(t)) = 1 \quad (5)$$

式中, $p_i(z(t))$ 由第 $i-1$ 个子模型/控制器切换到第 i 个的概率,由监督级切换规则所确定。

监督级控制器切换规则的设计是本文中最重要任务,其模糊切换多模型系统定义如下:

首先把初始状态为 x_0 的切换序列表示为

$$S = x_0; (i_0, t_0), (i_1, t_1), \dots, (i_N, t_N), \dots \quad (6)$$

切换序列可能是有限的,也可能是无限的。取 $t_{N+1} = \infty$, 且当 $i > N$ 时所有结论依然成立,则无限序列就变为了有限。设: $\pi_1(s) \triangleq x_0; i_0, i_1, \dots, i_N, \dots$ 为子模型切换序列索引, $\pi_2(s) \triangleq x_0; i_0, i_1, \dots, i_N, \dots$ 为局部模型切换序列切换时间。用 $S|i$ 表示为第 i 个活动的局部模型终止时间。

$1(t)$ 为严格增时间序列 $T = t_0, t_1, \dots, t_N$ 全部时间段集合,即

$$1(t) = \bigcup_{j \in z_i} [t_{2j}, t_{2j+1}] \quad (7)$$

那么, $1(S|i)$ 为第 i 个局部模型活动时间段, $\varepsilon(T)$

表示切换时间的偶数序列,式为

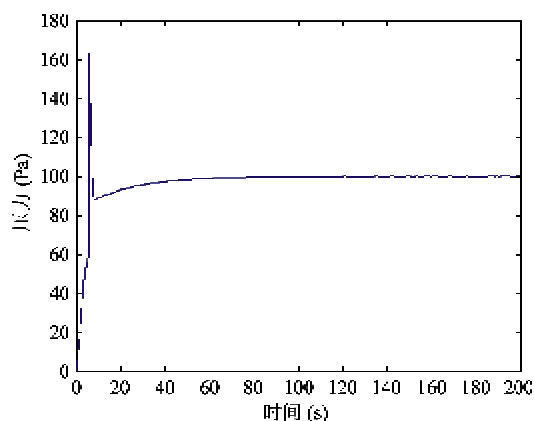
$$\varepsilon(T) = t_0, t_2, t_4, \dots \quad (8)$$

本文通过监督级切换方法即可较好地保证N2#焦炉集气管压力的多模型平滑切换,避免了因切换而产生的不稳定及振荡现象。

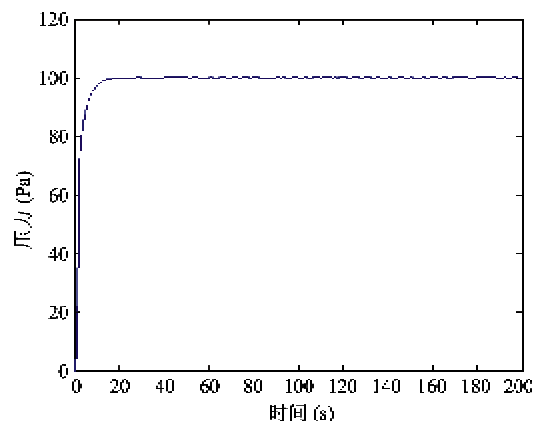
4 仿真

将本文方法通过对N2#集气管压力进行仿真得到了验证。文献[10]对该焦炉进行了分析,可分为两种工况,因此根据现场的集气管压力数据可以建立两个T-S模型:模型1: $G(s) = 0.02406/s^2 + 1.509s + 0.504$, 相应的控制器为模糊控制器1;模型2: $G(s) = 0.02406/s^2 + 1.509s + 1.232$, 相应的控制器为模糊控制器2。

图2为系统单位阶跃响应曲线。图2(a)为文献[10]中采用专家控制策略进行切换控制的运行曲线。当从模糊控制器1切换到模糊控制器2时,曲线出现了较大的超调,而且切换曲线出现了不平滑现象,调节时间达到了50s,动态响应时间长。采用



(a) 直接切换的变结构控制



(b) 平滑切换的变结构控制

图2 阶跃响应曲线

该方法切换虽然系统最终输出能满足控制要求,但切换过程动态性能较差。图 2(b)为采用本文的控制策略,切换过程的调节时间由直接切换的 50s 缩短到 20s,而且超调量近乎为 0,该切换过程动态性能得到了有效的改善,具有较好的动态响应效果。

5 运行情况

该系统自 2008 年改进投运之后,工作可靠,性能稳定,操作方便,控制精度满足了现场工艺要求。图 3 所示为 N2#集气管压力采用文中所提出的算法

后的运行曲线。从曲线中可以看出,当集气管压力在 40s 时,出现过一次切换控制。由于采用基于满意聚类的 T-S 方法建模以及平滑切换策略,能够根据当前控制曲线的特征选择较好的模型/模糊控制器,使得切换控制有了较大的改善,切换时间从图 1 的 50s 缩短到 10s,切换平稳,调节时间短,较好地改善了系统动态性能,其中压力波动范围在 $\pm 10\text{Pa}$ 占全部采样的 90%,压力波动范围在 $\pm 20\text{Pa}$ 占全部采样的 99%,进一步保证了集气管稳定在工艺波动范围。

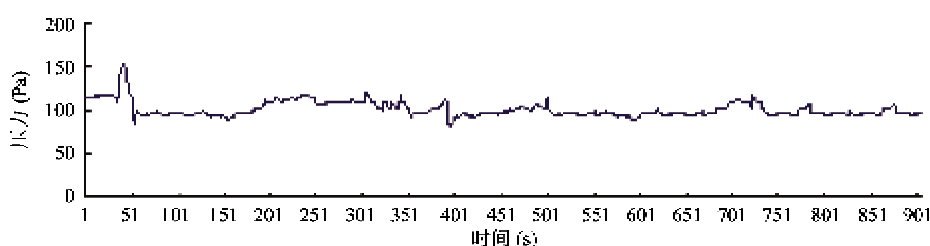


图 3 N2#焦炉集气管压力运行曲线(压力给定值为 100Pa)

采用本文所提出的控制算法后,焦炉集气管压力得到了进一步的稳定,显著减少了对大气环境的污染,减少了焦炉工人频繁灭烟、灭火的工作强度,提高了劳动生产率。如在我国焦炭行业及其它行业推广,将产生巨大经济效益和社会效益。

6 结论

当 N2#焦炉集气管压力的结构或参数随生产条件而变化时,该过程控制模型可视为多模型,多模型自适应控制策略是控制该过程的常用方式,但实施多模控制时控制器时常需要在已建立控制器模型集中的控制器间切换,这种切换会引起系统的不平滑性,而本文提出的基于平滑切换的变结构控制,有效改善了切换过程的系统动态性能,并通过仿真和实际运行结果证明了这种切换策略的有效性。

参考文献

- [1] Chaichenko V I, Lavrov K G. Pressure stabilization of direct coke oven gas in the gas collectors of coke batteries. *Coke & Chemistry*, 1989, 64 (7): 72-76
- [2] 周国雄, 赖旭芝, 曹卫华等. 焦炉集气管压力智能解耦控制系统的应用. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(3): 558-561
- [3] 阳春华, 沈德耀. 集气管压力的智能控制设计与实现. 小型微型计算机系统, 1999, 20 (7): 550-553
- [4] 刘晓强, 郝榕, 谭得健. 焦炉集气管分管压力自适应模糊控制算法. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2000, 19(4): 390-393
- [5] Yang C, Wu M, Shen D, et al. Hybrid intelligent control of gas collectors of coke ovens. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(7): 725-733
- [6] Zhou B, Li W Y. Application of fuzzy theory on gas collector control. In: *Proceedings of the 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Piscataway, USA, 2003. 2516-2519
- [7] 秦斌, 吴敏, 王欣等. 基于多智能体强化学习的焦炉集气管压力多级协调控制. *电子学报*, 2006, 34(10): 1847-1851
- [8] 易以锋, 方康玲, 李威. 焦炉集气管压力控制的一种新方法. *微计算机信息*, 2006, 22(1-1): 45-47
- [9] 秦斌, 吴敏, 王欣等. 基于 MAS 的分布式焦炉集气管压力解耦控制. *控制理论与应用*, 2006, 23 (6): 961-966
- [10] 周国雄, 吴敏, 曹卫华等. 焦炉集气管压力的变结构模糊控制研究. *信息与控制*, 2007, 36(6): 732-738
- [11] Liutkevicius R. Fuzzy Hammerstein model of nonlinear plant. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2008, 13(2): 201-212
- [12] Skrjanc I, Blazic S, Agamennoni O E. Interval fuzzy modeling applied to Wiener models with uncertainties.

- IEEE Transaction On Systems, Man, And Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2005, 35(5): 1092-1095
- [13] Genceli H, Nikoao M. Design of robust constrained model-predictive controllers with Voltaire series. *AICHE Journal*, 1995, 41(9):2098-2107
- [14] Kermiche S, Saidi M L, Abbassi H A, et al. Takagi-Sugeno based controller for mobile robot navigation. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 6(8):1838-1844
- [15] Jeon G, Jeong J. Designing Takagi-Sugeno fuzzy model-based motion adaptive deinterlacing system. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2006, 52(3): 1013-1020

Variable-structure control of gas collector pressure based on smooth switching strategy for coke ovens

Zhou Guoxiong^{* **}, Lei Qi^{**}

(^{*} School of Computer and Information Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004)

(^{**} School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract

The shortcomings of the variable-structure control for the gas collector pressure in coke ovens based on the expert switching strategy, such as the poor dynamic switching property, the pressure instability caused by condition switching, are analyzed technologically, and based on this, a new variable-structure control method based on the smooth switching strategy for gas collector pressure is proposed. The method is described as below: According to the difference of industrial condition, the corresponding dynamic sub-model is built by using the Takagi-Sugeno fuzzy model based on the fuzzy clustering satisfied method, and the corresponding fuzzy controller is chosen to control the pressure. In order to ensure the track smoothness of the sub-model, the sub-model and the corresponding sub-controller are dynamically switched by using a supervisory-level controller. The simulation and practical application results demonstrate the validity of the method.

Key words: smooth switching, Takagi-Sugeno fuzzy model, variable-structure control, gas collector pressure