

文章编号: 1001-0920(2005)08-0909-04

智能控制方法在焦炉控制中的应用

高宪文, 张 昊, 蔡晓燕

(东北大学 a 教育部流程工业综合自动化重点实验室, b 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 以某焦化厂 1# 和 2# 焦炉集散控制系统的开发为背景, 提出了前馈反馈控制方法来优化焦炉对象的燃烧控制。前馈模型根据物料燃烧和焦化过程的热平衡方程计算出前馈的偏差量, 快速而直接地调整供气量; 反馈采用 BP 神经网络自适应控制。针对焦炉生产过程的简化模型, 在 Matlab 中实现了 BP 神经网络自适应控制算法。仿真研究表明该方法应用于焦炉控制是可行的。

关键词: 神经网络; 自适应控制; 前馈控制; 反馈控制

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Application of the Intelligent Control Method to Coke Ovens

GAO Xianwen, ZHANG Hao, CAI Xiaoyan

(a Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, China; b School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China Correspondent: GAO Xianwen, Email: gaoxianwen1@sina.com)

Abstract: Based on the distributed control systems of two coke ovens in some steel mill, a method with forward back and feedback control is presented to control the combustion of the coke ovens. In the forward back model, the equation of combustion and coke process are used to compute the bias. In the feedback model, the neural adaptive method is adopted to control the output temperature. The simulation results of the proposed algorithm applied to a simplified coke oven model show the feasibility of the method.

Key words: Neural network; Adaptive control; Forwardback control; Feedback control

1 引 言

焦炉是钢铁企业中的耗能大户, 如何降低能耗, 提高产量和质量是焦炉控制和管理的核心问题。焦化过程是一个传热和化学变化的过程, 加上焦炉炉体结构复杂, 操作条件恶劣, 因此在控制上很难实现^[1,2]。为了节能和增产, 上个世纪 60 年代以来, 工业发达国家投入大量的人力和财力用于焦炉计算机控制系统的研究、开发和应用, 取得了明显的经济效益^[3,4]。焦炉是结构独特的工业炉窑, 在炼焦厂的总能耗中, 焦炉加热用的煤气量约占总能耗的 70%。因此, 实现焦炉加热过程的最优控制, 对于降低焦炉能耗, 提高焦炭质量、延长焦炉寿命、减少环境污染都有重要的意义。

近年来, 我国从实际出发研究和开发出了一系列新型的焦炉加热控制技术, 获得了良好的控制效果。安徽工业大学化工系开发出焦炉加热系统计算机优化串级控制技术, 经在国内 20 多座焦炉上推广应用, 最长运行时间超过 4 年。这项技术投资少, 回收期短, 效果明显, 各项指标已达到国内外先进水平^[6]。

近年来, 模糊控制、专家系统、神经网络等人工智能技术的广泛应用, 为焦炉加热过程的自动控制开辟了新的途径^[7,8]。应用成果说明在焦炉加热系统中引入人工智能控制方法, 并与传统的控制方法相结合, 可以取得较好的控制效果。本文依据某焦化厂的工艺状况, 提出将神经网络与传统控制相结合的

收稿日期: 2004-10-26; 修回日期: 2005-03-16

作者简介: 高宪文(1955—), 男, 辽宁盘锦人, 教授, 博士, 从事生产过程建模、控制与优化等研究; 蔡晓燕(1981—), 女, 湖北黄石人, 硕士生, 从事神经网络控制的研究。

新型焦炉燃烧优化控制策略,并对这种优化控制策略的可行性进行探讨

2 焦炉控制难点分析与控制策略选择

焦炉由多个炭化室和燃烧室交替配置而成,煤气和空气经蓄热室预热后进入燃烧室扩散并燃烧,产生的热量经炉墙传给炭化室;煤在炭化室中进行高温干馏,形成焦炭;燃烧产生的废气经蓄热室回收余热后排放,每隔 20 min 交换一次煤气、空气和废气的流向。焦炉的加热过程是单个燃烧室间歇、全炉连续,受多种因素干扰的热工过程,是典型的大惯性、非线性、时变的复杂系统。

从焦炉生产工艺可知,焦炉的加热过程具有以下特点:1)焦炉属于间歇式生产过程^[5],按照操作计划以单炉为单位进行操作;2)焦炉对象具有大惯性和大滞后特性;3)过程机理复杂,具有非线性和变量间耦合的复杂性,生产过程变量间有制约关系;4)生产过程中变量变化剧烈,导致干扰强烈;5)焦炉是个大的热封闭系统,温度测量具有特殊性和复杂性^[5]。

由焦炉加热的特点可知焦炉炼焦的控制难点有二:一是建立有效的燃烧和结焦模型^[9];二是温度的测量。基于对焦炉炼焦特点和控制难点的分析,焦炉燃烧控制系统以优化焦炉燃烧、提供最佳供热量为主要目的,选择整个炉组作为热量和温度控制对象。根据焦化机理数学模型和长期的焦化加热经验,全面考虑焦炉操作、煤和燃气特性、焦炉过程变量等可测干扰对燃烧控制的影响,采用以反馈为主、前馈为辅的控制策略,建立前馈模型计算增量,以神经网络自适应控制器作为反馈,提高系统的控制精度和稳定性。焦炉加热控制系统模型结构如图 1 所示。

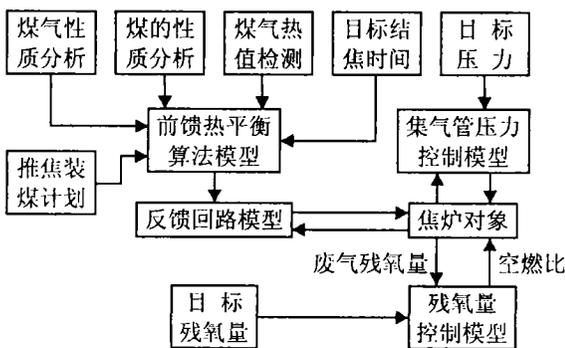


图 1 焦炉加热控制系统模型结构

3 前馈增量计算模型

3.1 热量供给与热量消耗

在炼焦过程中,煤气与空气混合发生化学反应,产生大量的热量。煤气燃烧产生的热量大部分用于煤的结焦,少部分通过废气排放和炉体散热而损失。热量的来源包括煤气反应热、煤气显热、空气显热和

煤的显热,热量消耗包括炉体表面散热、焦炭显热、荒煤气显热和排放的废气显热。

燃烧用空气的物理热^[9]

$$Q_2 = (V_g - V_{不}) \alpha_{理} c_{\alpha} \alpha_s \quad (1)$$

装炉煤物理热

$$Q_3 = G_{湿} c_{煤} t_{煤} \quad (2)$$

加热煤气燃烧热^[9]

$$Q_4 = (V_g - V_{不}) Q_{低} \quad (3)$$

焦炭显热量和荒煤气显热量并入结焦热中,排放的废气显热热量

$$Q_{废} = V_g c_g t_g \quad (4)$$

以上各式中, $\alpha_{理} = L_{实}$ 为实际空气量占进入的煤气流量的比例, $G_{湿}$ 为炼焦用湿煤量 (kg/h), $Q_{低}$ 为煤气热值, V_g 为废气量 (m³/h)。

加热煤气的物理热^[9]

$$Q_1 = (V_g - V_{不}) c_g t_g \quad (5)$$

式中: V_g 为用于焦炉加热的煤气流量 (m³/h), $V_{不}$ 为换向期间不进入焦炉的煤气量 (m³/h)。

焦炉在运行过程中,每小时内都要进行二次换向。考虑到换向时有一段时间不向焦炉送煤气,则进入焦炉的实际每小时流量将有所减少。

定义换向校正系数

$$K_{换} = \frac{60 - m\tau}{60} \quad (6)$$

式中: m 为 1 h 内焦炉的换向次数, τ 为每次换向焦炉不进煤气的时间 (min)。

$$V_{不} = V_g \frac{m\tau}{60} \quad (7)$$

3.2 炼焦热和炼焦耗热

结焦过程的炼焦热可以通过理论计算而得到。日本基于平板导热模式,提出了如下算式:

$$q = c(t_c - t_0) \text{ (kJ/kg)} \quad (8)$$

式中: c 为煤的有效比热, t_c 为焦饼中心温度, t_0 为装炉煤温度。所以总炼焦耗热量为

$$Q_{结} = \frac{\text{每个炭化室装煤量} \times \text{炭化室数} \times q}{\text{结焦时间}} \quad (9)$$

3.3 热平衡方程

基于以上分析并根据热力学第一定律,可以建立如下热平衡方程^[9]:

$$\begin{aligned} & \text{燃烧热} + \text{煤气显热} + \text{空气显热} + \text{入炉煤显热} = \\ & \text{表面散热} + \text{焦炭显热} + \text{荒煤气显热} + \\ & \text{排出的废气显热} \end{aligned} \quad (10)$$

在结焦的不同阶段,未成焦炭煤料的显热和荒煤气显热是变化的。这两种热可用炼焦热来表达,因此式(10)又可表示为^[9]

$$\text{燃烧热} + \text{煤气显热} + \text{空气显热} + \text{入炉煤显热} =$$

表面散热 + 炼焦热 + 排出的废气显热 (11)

通过热平衡方程计算出炼焦所需的燃烧热, 再根据现场检测的煤气热值计算出所需煤气流量增量, 作为控制系统的前馈 热平衡方程中计算热量的时间单位为 h 利用这个热平衡方程, 可以调整煤气供气量的大小 把预测到的变化通过前馈及时反馈给被控对象 这个量不一定准确, 需要现场在线校正 通过温度反馈回路对其进行补充, 及时调节供气量, 使焦炉处于最佳的运行状态

4 神经网络自适应温度反馈控制及其仿真

4.1 焦炉温度反馈控制模型

焦炉系统温度反馈回路的作用是保持炉温的稳定 焦炉生产是间歇性生产过程, 并且变化剧烈 当炭化室处于推焦状态时, 对热量需求少, 导致平均炉温上升; 交换机交换期间, 蓄热室内煤气和空气量会大幅度变化, 导致燃烧室温度急剧变化; 不同炭化室处于不同的结焦阶段, 对热量的需求会有不同, 导致焦炉温度的不确定变化

线性系统的自适应控制已经比较成熟, 但对一般的非线性系统, 解决自适应控制问题仍然相当困难 神经网络的出现, 特别是它对一般非线性函数的逼近能力, 给非线性系统的自适应控制带来了希望 自适应控制系统本质上是非线性的随机控制系统, 而传统的方法难以实现这种控制 当现实世界不能表达为数学模型时, 神经网络这一模仿人的结构往往比较容易实现

在本结构中, 学习过程分为两部分: 首先是神经网络建模器的学习过程, 它以系统运行中收集的 u 和 y 数据集为训练样本, 以实际系统输出与神经网络建模器输出之间的差值作为误差项, 调整网络权值, 使神经网络建模器在 u 的邻域内产生 u 到 y 的正确映射; 然后使用神经网络建模器对受控系统进行建模, 其目的是利用总体误差进行反向传播, 即使受控系统的函数形式未知, 仍可直接用 BP 算法极小化总体误差

对于本文的神经网络自适应控制, 目标是焦炉的立火道平均温度保持稳定 控制量是煤气管路的压力, 管路自身有个压力稳定 PI 控制单回路, 其给定是前馈增量算法和反馈自适应算法输出之和 对焦炉立火道平均温度取为 y , 对温度给定取为 r , 对神经自适应控制的结果输出即控制量设为 u , 对前馈增量算法计算出的控制增量设为 u . 焦炉温度反馈控制模型如图 2 所示

4.2 神经网络自适应控制的仿真研究

为检验神经元自适应控制在焦炉对象环境中

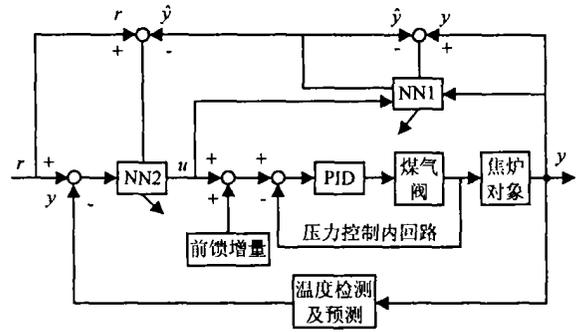


图 2 焦炉温度反馈控制模型

的有效性和实用性, 并与常规 PD 控制器的性能进行比较, 根据焦炉对象的简化数学模型, 对常规 PD 和神经元自适应控制进行仿真试验 为方便起见, 仿真中忽略 PI 压力内回路和前馈增量 把焦炉对象看成具有时滞的一阶惯性环节, 其传递函数为

$$G(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (12)$$

首先取得辨识网络的输入输出数据, 在 Matlab 中对简化模型输入随机离散信号, 得到 200 组输入输出模式对 然后离线单独训练辨识部分的网络, 辨识网络选为 10-15-1 型 BP 网络, 训练前的权值初值选取 0~1 间的随机值, 训练 2 000 次后得到在线辨识的权值初值 对神经元自适应控制进行在线仿真, 辨识网络为 10-10-1, 初始权值为离线训练出的权值 控制网络为 4-5-1, 初始权值为随机值, 辨识网络 $\eta = 0.001$, 控制网络 $\eta = 0.5$, 辨识网络 $\epsilon = 0.01$, 控制网络内循环次数为 60 对回路设一给定值 1, 将被控对象简化模型的输入输出初始值均设为 0, 然后进行 100 组数据的仿真实验

在线控制时的输出结果如图 3 所示, 被控对象的输出曲线比较平滑, 在 8 步左右便可逼近给定值, 并且没有稳态误差, 前面几个为零的值是受滞后环节的影响 图中同时给出了 PD 参数调试较好时的阶跃曲线, 其响应速度较神经元自适应算法要慢

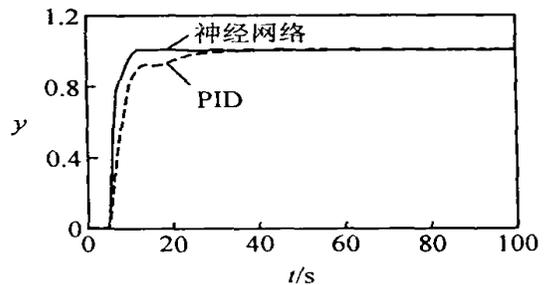


图 3 在线控制的输出结果

图 4 是模型参数发生同样变化时, 神经网络自适应控制与 PD 控制器的控制结果 可见当模型参数变化时, 神经元自适应控制的适应能力很强, 控制

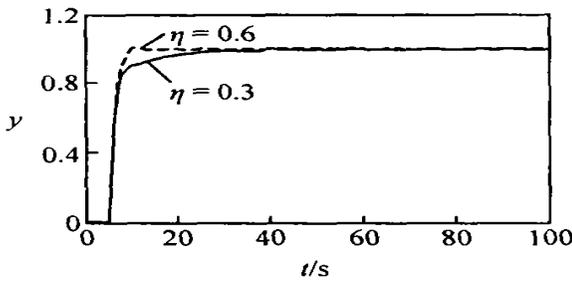
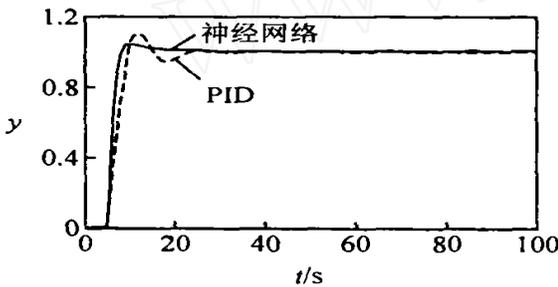


图4 模型参数变化时的结果

效果较为理想;而普通PID控制器的控制效果变差,超调很大,适应能力很差

学习速率 η 是神经网络的重要参数,它的大小直接影响到网络的学习速度。在同样的循环次数下, η 越大,控制器的相应速度越快,逼近真实值的能力越强。但为防止网络值发散, η 不可过大,否则会出现超调。图5中辨识网络为10-10-1,初始权值为离线训练出的权值;控制网络为4-10-1,初始权值为随机值。辨识网络 $\eta = 0.001$,控制网络 $\eta = 0.3$ 和 0.6 ,辨识网络 $\epsilon = 0.01$,控制网络内循环次数为20。

图5 控制网络在 η 值不同时的输出结果

对于辨识网络,存在误差精度 ϵ ,靠 ϵ 调整循环次数, ϵ 越小逼近能力越强。对于控制网络,输出需要下一个采样周期才能起作用,因此没有精度参数可以利用,故设置内循环次数来控制权值。内循环次数越大,响应速度越快,但太大又会出现超调。图6中辨识网络为10-10-1,初始权值为离线训练出的权值;控制网络为4-5-1,初始权值为随机值。辨识网络 $\eta = 0.001$,控制网络 $\eta = 0.5$,辨识网络 $\epsilon = 0.01$,控制网络内循环次数为15和50。

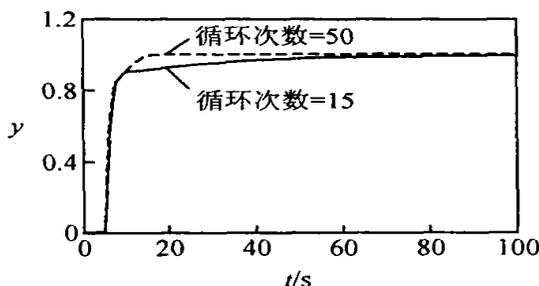


图6 控制网络在内循环次数不同时的输出结果

仿真研究表明,当网络未出现饱和时,神经网络自适应算法具有很强的适应能力,但一旦出现饱和,结果将发散。为了避免饱和,要控制输入输出量的值域,现场数据要作线性归一化处理。辨识网络误差精度 ϵ 越小,越能逼近真实值;超调量与相应速度的矛盾可以通过改变控制网络的循环次数来解决。控制网络的中间层神经元个数增多,控制系统响应变快;适当增加辨识网络中间层单元可以提高辨识精度,减小控制过程的超调。

5 结论

本文依据某焦化厂的实际工艺状况,提出了前馈反馈控制方法来实现优化焦炉对象的燃烧控制。前馈中根据热平衡方程式计算煤气供应量的前馈增量;反馈采用BP神经网络自适应控制,并使用两个神经网络,一个用于辨识被控对象,一个作为神经网络控制器。通过在线辨识,调整控制器网络的权值,实现自适应控制。神经元自适应反馈控制可以实现对焦炉对象的有效控制,综合发挥前馈和反馈的各自优势,将在实际生产过程中取得良好的效果。

参考文献 (References)

- [1] 吴宏博,朱宏祥,王新立,等. 焦炉加热过程计算机控制的现状与发展[J]. 冶金自动化, 2000, 24(6): 6-10.
(Wu H B, Zhu H X, Wang X L, et al. Present State and Development of Computer Control for Coke Oven Battery Heating Process [J]. Metallurgical Industry Automation, 2000, 24(6): 6-10.)
- [2] 吴宏博,朱宏祥,王新立,等. 焦炉加热过程数学模型的研究现状及发展趋势[J]. 工业加热, 2000, 29(3): 4-7.
(Wu H B, Zhu H X, Wang X L, et al. Present Status and Developmental Trend of Mathematical Model for Coke Oven Heating Process [J]. Industrial Heating, 2000, 29(3): 4-7.)
- [3] Jukka Swanijung, Petri Palmu. Development of Coke-oven Battery Process Management System at Rautaruukki Steelworks[J]. Iron and Steel Engineer, 1996, 73(1): 46-49.
- [4] Choi K I, Kim S Y, Suo J S, et al. A Mathematical Model for the Estimation of Flue Temperature in a Coke Oven [A]. Ironmaking Conf Proc [C]. Chicago, 1997: 107-113.
- [5] 宁方青,姚昭章. 多模式模糊控制技术在焦炉加热控制中的应用[J]. 自动化与仪表, 1999, 14(4): 37-39.
(Ning F Q, Yao Z Z. Application of Multimodel Fuzzy Control in Heating System of Coke Oven [J]. Automation and Instrumentation, 1999, 14(4): 37-39.)

(下转第916页)

$$\begin{bmatrix} 0.8 & 0.7 \\ 0.8 & 0.748 & 13 \\ 0.6 & 0.5 \\ 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

利用式(5)对拓展互补判断矩阵 $\bar{C}^{(1)}, \bar{C}^{(2)}, \bar{C}^{(3)}, \bar{C}^{(4)}$ 进行集成, 得到群体互补判断矩阵

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.371 & 932 & 0.62 \\ 0.618 & 0.68 & 0.5 & 0.368 & 762 \\ 0.38 & 0.631 & 238 & 0.5 \\ 0.248 & 0.250 & 0.21 & 0.283 & 676 \\ 0.36 & 0.355 & 187 & 0.453 & 415 \\ 0.751 & 0.750 & 0.64 \\ 0.79 & 0.644 & 813 \\ 0.716 & 0.324 & 0.546 & 585 \\ 0.5 & 0.520 & 936 \\ 0.479 & 0.064 & 0.5 \end{bmatrix}$$

利用式(6)和(7)计算 $\delta^{(k)}$ 和 $\sigma^{(k)}$, 得

$$\begin{aligned} \delta^{(1)} &= 0.183 & 676, & \sigma^{(1)} &= 0.097 & 024, \\ \delta^{(2)} &= 0.146 & 585, & \sigma^{(2)} &= 0.069 & 820, \\ \delta^{(3)} &= 0.09 & , & \sigma^{(3)} &= 0.053 & 906, \\ \delta^{(4)} &= 0.179 & 064, & \sigma^{(4)} &= 0.076 & 188 \end{aligned}$$

对于任意 k , 均有 $\delta^{(k)} < 0.2, \sigma^{(k)} < 0.1$, 因而决策者的意见基本一致. 利用式(8)求解群体互补判断矩阵 \bar{C} 的排序向量

$$\omega = (0.219 \ 684, 0.221 \ 082, 0.213 \ 707, 0.163 \ 143, 0.182 \ 383)^T$$

按排序向量 ω 的分量大小对方案 $x_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 进行排序, 得 $x_2 > x_1 > x_3 > x_5 > x_4$, 最佳方案为 x_2

5 结论

本文给出一种基于残缺互补判断矩阵的交互式群决策方法. 该方法首先利用残缺互补判断矩阵的

积型一致性, 把每个残缺互补判断矩阵拓展为完整的互补判断矩阵, 并把所有个体拓展互补判断矩阵集成为群体互补判断矩阵; 然后基于群体互补判断矩阵与个体拓展互补判断矩阵之间的偏离阈值同决策者进行交互, 与群意见分歧较大的决策者需依照群意见来确定分歧所在, 进而修正和调整自己的评估信息, 使决策者的意见尽可能达到一致, 从而使决策结果更具科学性和合理性

参考文献(References)

[1] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
(Xu Z S. Uncertain Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)

[2] Chiclana F, Herrera F, Herrera V E. Integrating Three Representation Models in Fuzzy Multipurpose Decision Making Based on Fuzzy Preference Relations[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 97(1): 33-48

[3] 樊治平, 姜艳平. 模糊判断矩阵排序方法研究的综述[J]. *系统工程*, 2001, 19(5): 12-18
(Fan Z P, Jiang Y P. An Overview of Priority Methods for Fuzzy Judgement Matrices [J]. *Systems Engineering*, 2001, 19(5): 12-18.)

[4] Baets B, Fodor J. Principles of Fuzzy Preference Modelling and Decision Making [M]. Ghent: Academic Press, 2003

[5] 徐泽水. 残缺互补判断矩阵[J]. *系统工程理论与实践*, 2004, 24(6): 91-97.
(Xu Z S. Incomplete Complementary Judgement Matrix [J]. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2004, 24(6): 91-97.)

[6] Xu Z S. Goal Programming Models for Obtaining the Priority Vector of Incomplete Fuzzy Preference Relation [J]. *Int J of Approximate Reasoning*, 2004, 36(3): 261-270

(上接第912页)

[6] 严文福, 郑明东, 宁方青, 等. 焦炉加热优化串级控制的应用[J]. *燃料与化工*, 2004, 35(3): 15-16
(Yan W F, Zheng M D, Ning F Q, et al. Application of Optimized and Series Control of Coke Oven [J]. *Fuel and Chemical Processes*, 2004, 35(3): 15-16.)

[7] Tan S H, Yu Y. Adaptive Fuzzy Modeling of Nonlinear Dynamical Systems [J]. *Automatica*, 1996, 32(4): 637-643

[8] Tanaka H, Yasuno M, Oshima H, et al. Application of

Fuzzy Inference to Combustion Control for Coke Oven [A]. *Ironmaking Conf Proc* [C]. Toronto, 1992: 509-513

[9] 陈友文, 王福利, 乔成和. 焦炉优化供热模型的研究与应用[J]. *钢铁*, 1998, 33(7): 5-7.
(Chen Y W, Wang F L, Qiao C H. Study and Application of Optimal Heat Supplying Model for Coke Oven Batteries [J]. *Iron and Steel*, 1998, 33(7): 5-7.)