

基于智能 PID 控制的燃气锅炉燃烧控制系统研究

谷洋洋, 李来春, 张绍娟

(中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:以燃气锅炉燃烧系统为研究对象,分别采用将模糊自适应控制理论, BP神经网络控制理论,和遗传算法控制理论与 PID(比例-积分-微分控制器)控制理论相结合去设计控制系统,通过 MATLAB(可视化数字仿真软件)分别进行仿真验证,并与传统控制系统的仿真曲线进行对比分析,得出智能 PID 控制明显优于传统 PID 控制的效果。为工业过程中的燃气锅炉燃烧控制系统采用智能 PID 控制器提供了理论基础。

关键词:燃气锅炉; 燃烧控制系统; 智能 PID 控制; 传统 PID 控制

中图分类号: U664.131 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.03.025

引言

燃气锅炉燃烧系统对象含有大滞后环节和大惯性环节,传统 PID 不能有效地实现其控制^[1]。智能控制理论的发展为 PID 参数的整定提供了新的方法,同时为锅炉燃烧自动控制开辟了新的途径。智能控制具有不依赖于被控对象精确的数学模型、较强的鲁棒性和抗干扰能力等优点,包括模糊控制、神经网络控制、遗传算法控制等,这些控制算法都能够实现 PID 参数的在线整定和优化^[2]。

基于燃气锅炉燃烧系统控制的实际情况,在传统 PID 控制的基础上,分别采用模糊控制算法、BP神经网络控制算法和遗传算法在线整定 PID 控制器参数,设计了3个智能 PID 控制器。在理论分析的基础上,通过系统仿真验证了这3种智能 PID 控制器优于传统 PID 控制器的控制效果。

1 燃气锅炉燃烧系统模型

控制对象是华电厦门集美能源站的启动锅炉。运行参数: $P = 2.2 \text{ MPa}$, $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, 设计参数: $P = 2.4 \text{ MPa}$, $T = 260 \text{ }^\circ\text{C}$ 。针对燃气锅炉的燃烧系统设计一套自动控制系统,并应用仿真软件对该系统进行

在线仿真,因此首先要建立控制对象的数学模型。

考虑到采用的控制算法并不要求控制对象模型具有很高的精确性,所以采用了一个近似的模型作为设计参考和仿真的对象。根据经验,燃气锅炉燃料量与蒸汽压力通道的动态特性可以近似认为是一个惯性环节与纯滞后环节构成,此时的传递函数为:

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

式中: K —锅炉正常运行时控制对象的增益; τ —系统输入的延迟时间, s; T —系统的时间常数, s。

由于实验条件的限制,不能进行实际的试验来辨识系统的数学模型,而是通过查找大量相关文献来确定控制对象模型的参数。根据文献[3-5]所描述类似的锅炉数学模型,最终确定此燃气锅炉的数学模型为:

$$G(s) = \frac{2.35e^{-3s}}{58s + 1} \quad (2)$$

该模型反映的是燃气锅炉的入口燃料量与出口蒸汽压力的非线性关系,但这个模型只能近似实际控制对象,由于在锅炉运行过程中会受到很多外部条件或锅炉自身的因素影响,实际模型必然会发生一定程度的变化。由于所研究的控制方案对模型的精确度要求不高,确定被控对象的数学模型是为了便于仿真,以证明控制算法的实时性和准确性。

2 智能 PID 控制器设计

2.1 模糊 PID 控制器设计

模糊自整定 PID 参数控制器原理为根据偏差的绝对值 E 以及偏差变化率的绝对值 EC 的大小和调整时间的长短,不断在线修正 PID 参数 k_p 、 k_i 、 k_d ,即以出口蒸汽压力的误差 E 和误差变化 EC 作为模糊控制器的输入量,以满足不同 E 和 EC 对控制器参数的不同要求。它与基本模糊控制器相比,增加了

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-05-23

作者简介: 谷洋洋(1988-),女,吉林长春人,中国船舶重工集团公司第703研究所助理工程师。

一个参数在线自整定机构。燃烧系统的模糊自适应 PID 控制器的设计如下:

(1) 建立模糊控制器输入、输出量

模糊控制器采用 5 个模糊变量,即 E 、 EC 和 k_p 、 k_i 、 k_d ,分别为蒸汽压力误差,蒸汽压力误差变化率和可调参数 PID 控制器相应的比例、积分、微分系数,其中 E 、 EC 为输入模糊变量,而 k_p 、 k_i 、 k_d 为输出模糊变量。

(2) 建立隶属函数

蒸汽压力误差 E 和误差的变化 EC 模糊论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 相应的语言值为 $\{NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)\}$ 。输出量 PID 控制器的可调参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊论域 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 模糊语言值的隶属函数和 E 的隶属函数相同。

(3) 建立模糊控制规则

模糊控制器的输出量是 PID 控制器的参数,而 PID 控制器的输出是燃烧系统的控制量,去调节燃气流量的值。控制量变化的原则是:当误差大或较大时,选取控制量以尽快消除误差为主;当误差较小时,选取控制量要注意防止超调,以尽量保持系统稳定,相应的整定规则如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 Δk_p 的模糊规则表

Tab. 1 Table of fuzzy rules for Δk_p

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

实时控制时,模糊控制器只需要接受相应的蒸汽压力偏差及偏差的变化量,将各变量分别模糊化为相应的模糊语言值,再根据模糊控制规则计算出输出变量 k_p 、 k_i 、 k_d 的值作为可调参数 PID 控制器的参数,进而获得控制器的输出量即燃气阀开度变化量。燃气阀开度变化量即供给燃气的变化量,以维持蒸汽压力为恒定值。

表 2 Δk_i 的模糊规则表

Tab. 2 Fuzzy control rule table of Δk_i

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 Δk_d 的模糊规则表

Tab. 3 Fuzzy control rule table of Δk_d

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NX	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2.2 BP 神经网络 PID 控制器设计

BP 神经网络自校正 PID 采用结构简单的 3 层 BP 神经网络,有 4 个输入节点,5 个隐含层节点和 3 个输出节点,其结构如图 1 所示。

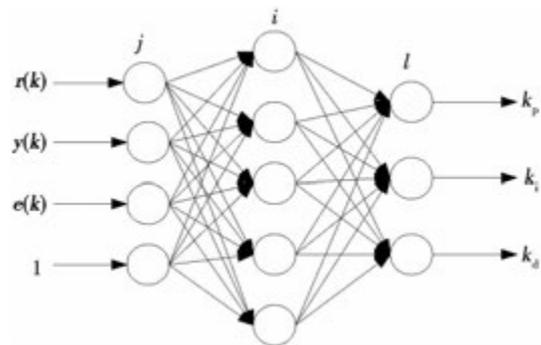


图 1 BP 神经网络结构

Fig. 1 BP neural network structure

网络隐层输入、输出分别为:

$$net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^3 \omega_{ij}^{(2)}(k) o_j^{(1)}(k) \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4) \tag{3}$$

$$o_i^{(2)}(k) = f[net_i^{(2)}(k)] \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

网络输出层的输入、输出分别为:

$$net_i^{(3)}(k) = \sum_{j=0}^4 \omega_{ij}^{(3)}(k) o_j^{(2)}(k) \quad (l = 0, 1, 2) \quad (5)$$

$$o_i^{(3)}(k) = g[net_i^{(3)}(k)] \quad (i = 0, 1, 2) \quad (6)$$

其中, $net_n^{(n)}(k)$ ($n = 1, 2, 3; m = j, i, l$) 代表网络第 n 层的输入量; $o_m^{(n)}(k)$ ($n = 1, 2, 3; m = j, i, l$) 代表网络第 n 层的输出量。

由 BP 神经网络原理可知 PID 控制器的 3 个参数为:

$$\begin{cases} o_0^{(3)}(k) = k_p \\ o_1^{(3)}(k) = k_i \\ o_2^{(3)}(k) = k_d \end{cases} \quad (7)$$

取性能指标函数为:

$$J = \frac{1}{2} [r(k+1) - y(k+1)]^2 \quad (8)$$

输出层系数调整公式为:

$$\Delta \omega_{li}^{(3)}(k+1) = -\eta \frac{\partial J}{\partial \omega_{li}^{(3)}(k)} + \alpha \Delta \omega_{li}^{(3)}(k) = \eta \delta_i^{(3)} o_l^{(3)}(k) + \alpha \Delta \omega_{li}^{(3)}(k) \quad (9)$$

式中: η —学习速率; α —惯性系数; $\omega_{li}^{(n)}$ — l 层与 i 层之间的加权系数。

$$\delta_i^{(3)} = e(k+1) \frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial \delta_i^{(3)}(k)} \cdot g'[net_i^{(3)}(k)] \quad (10)$$

用符号函数 $\text{sgn}\left(\frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}\right)$ 代替未知的 $\frac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}$, 通过调整 η 来补偿这个不精确的近似。

同上可得, 隐层加权系数调整公式为:

$$\Delta \omega_{ij}^{(2)}(k+1) = -\eta \frac{\partial J}{\partial \omega_{ij}^{(2)}(k)} + \alpha \Delta \omega_{ij}^{(2)}(k) = \eta \delta_i^{(2)} o_j^{(1)}(k) + \alpha \Delta \omega_{ij}^{(2)}(k) \quad (11)$$

$$\delta_i^{(2)} = f'[net_i^{(2)}(k)] \sum_{l=0}^2 \delta_l^{(3)} \omega_{li}^{(3)}(k) \quad (12)$$

基于 BP 神经网络的 PID 控制算法计算步骤:

(1) BP 神经网络结构的确定: 确定输入层节点数和隐含层节点数, 设置各层加权系数的初值 $\omega_{ij}^{(2)}(0)$ 、 $\omega_{li}^{(3)}(0)$, 给定学习速率 η 和惯性系数 α , 此步骤时 $k = 1$;

(2) 通过采样可得到 $r(k)$ 和 $y(k)$, 计算出 $e(k) = r(k) - y(k)$;

(3) 根据式(3) - 式(7) 计算神经网络各层的输入和输出, 网络输出层的输出就是 PID 控制器的 3 个可调参数 k_p 、 k_i 、 k_d 。

(4) 根据式(9) - 式(12) 可以在线调整加权系数 $\omega_{ij}^{(2)}(k)$ 和 $\omega_{li}^{(3)}(k)$, 能够实现 PID 控制器参数的自适应调整。

(5) 设置 $k = k + 1$, 返回到 1 循环计算, 直到满足性能指标。

2.3 遗传算法 PID 控制器设计

燃烧控制系统的 PID 控制器由两部分组成, 一部分是经典的 PID 控制器, 其 3 个参数为在线整定式; 第二部分是遗传算法, 根据系统的运行状态调节 PID 控制器的参数 k_p 、 k_i 、 k_d , 以期待达到控制出口蒸汽压力的指标最优化。

应用遗传算法实现 PID 控制器参数寻优过程为:

(1) 参数编码和种群初始化

在 PID 控制器中, 需要优化 3 个参数即比例系数 k_p 、积分时间系数 k_i 、微分时间系数 k_d 。本研究采用二进制编码方式, 每个参数采用 10 位无符号二进制码表示, 因此染色体长度为 30。各参数二进制字符串值与实际值之间的关系为:

$$k = k_{\min} + y_i (k_{\max} - k_{\min}) / (2^n - 1) \quad (13)$$

式中: y_i —参数 k 的二进制编码; $[k_{\min}, k_{\max}]$ —参数 k 的取值范围; n —二进制编码长度。

根据经验可设置参数 $k_p \in [k_{p\min}, k_{p\max}]$, $k_i \in [k_{i\min}, k_{i\max}]$, $k_d \in [k_{d\min}, k_{d\max}]$, $n = 10$ 。

(2) 适应度函数的确定

利用遗传算法优化 PID 控制器的 3 个系数, 本质上就是基于适应度函数的参数寻优问题, 适应度函数代表个体对环境适应力的强弱。适应度函数表达式为:

$$J = \int_0^{\infty} [w_1 | e(t) | + w_2 u^2(t)] dt + w_3 t_u \quad (14)$$

式中: $e(t)$ —系统误差; $u(t)$ —控制量; t_u —上升时间 s ; w_1 、 w_2 、 w_3 —权值, 取 $w_1 = 0.999$, $w_2 = 0.001$, $w_3 = 2$ 。

由于 PID 参数优化是求目标函数极小值的问题, 故将求极小值的问题转换为求极大值的问题即:

$F = 1/J$ 。

(3) 控制参数的选择

遗传算法中的控制参数包括种群规模 N , 交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 。这些参数影响遗传算法的搜索效率和寻优结果。根据经验取 $N = 30, P_c = 0.6, P_m = 0.01$ 。

(4) 初始种群的形成

在仿真过程中,大致设定一个经验值,根据仿真曲线进行修改,目的在于缩小搜索空间迅速得到最优解。运用 Ziegler - Nicnols 法的经验公式计算出 k_p, k_i, k_d 的值。

k 取值范围: $k_p \in [0, 20], k_i \in [0, 1], k_d \in [0, 1]$ 。

(5) 遗传操作

遗传算法的选择操作是由选择算子来完成的,选择的算子采用适应度比例法,个体能够保留的概率正比于其适应度;交叉算子的作用是对选择下来的成对个体的染色体按某种方式交换部分基因而形成新的个体,采用操作简单的两点交叉法;变异算子根据变异概率,从种群中随机选取若干个体,从这些个体的随机位进行取反运算。

3 仿真分析

根据第二节中建立的燃烧控制系统近似模型,分别利用传统 PID 控制器、模糊自适应 PID 控制器、基于 BP 神经网络 PID 控制器和遗传算法 PID 控制器在 MATLAB 仿真软件中进行仿真模拟,对单位“1”的阶跃信号的响应曲线进行分析和比较。

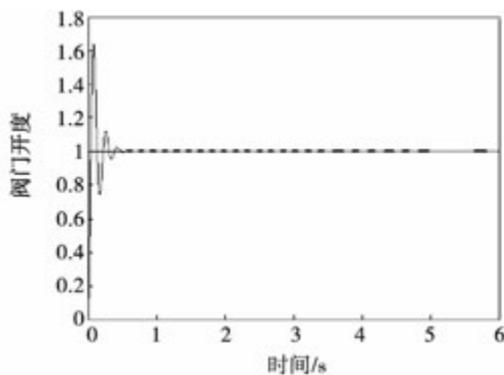


图 2 传统 PID 控制响应曲线图
Fig. 2 Chart showing the response curves of the traditional PID control

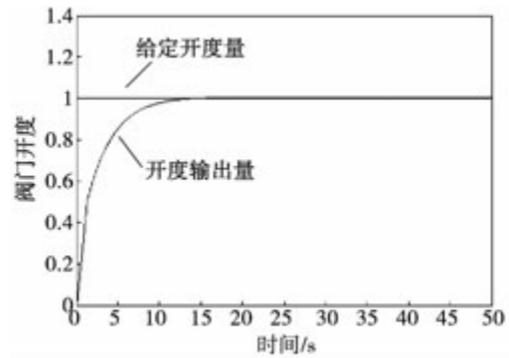


图 3 模糊自适应 PID 响应曲线
Fig. 3 Fuzzy self-adaptive PID response curve

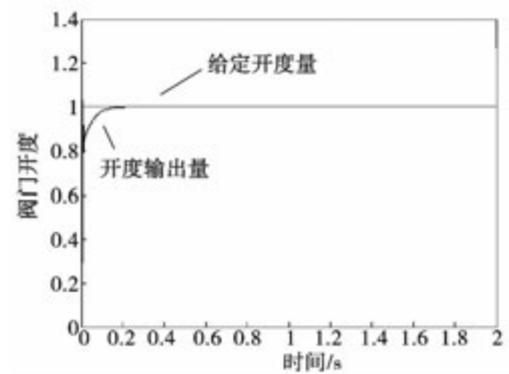


图 4 BP 神经网络 PID 响应曲线
Fig. 4 BP neural network PID response curve

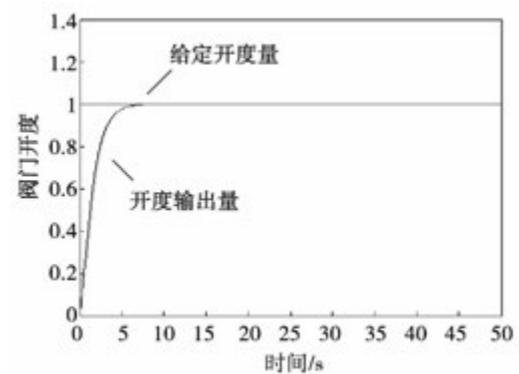


图 5 遗传算法 PID 的响应曲线
Fig. 5 Genetic algorithms PID response curve

从仿真曲线中可以看出,3 种智能控制算法整定的 PID 控制方式响应曲线明显优于传统 PID 控制方式,基本无超调量,能够很好地完成对给定信号的跟踪。对于 3 种智能控制算法,其中基于 BP 神经网络 PID 控制方式的响应时间比传统增量式 PID 控制方式明显缩短,唯一不足之处在于 BP 神经网络

控制的实现比较复杂;模糊自适应 PID 控制和遗传算法 PID 控制的响应时间稍长但是无超调运行稳定,对于锅炉这种大时滞系统是正常情况,只要响应曲线没有超调,控制效果就很理想,系统会稳定运行。

4 结 论

对于传统 PID 控制方式,参数整定的优劣直接影响着实际控制效果,若参数整定不合理,控制效果会变得很差,严重还会导致不满足控制要求,而且要想得到较理想的 PID 控制参数,就离不开准确的数学模型,像燃气锅炉燃烧系统这样难建立准确模型的系统,很明显传统 PID 控制的参数整定比较困难。燃气锅炉的燃烧系统会受到多种因素的影响,它的参数及特性会发生变化,本研究设计的 3 种智能 PID 控制的最大优势就是能够根据控制对象的变化,自动地在线调整控制器的参数,而且智能 PID 控制对 PID 参数的初始值要求不高。

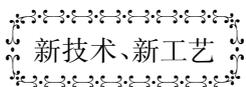
从仿真曲线上明显看出智能 PID 控制方式的响应曲线稳定性较高,不存在超调。尤其对于锅炉这种大滞后的惯性,系统稳定性提高那么控制效果就会进一步改善。所以智能 PID 控制应用在燃气锅炉燃烧系统中,在某种程度上能够改善传统 PID 控制对燃烧的控制效果,具有一定的进步意义。将该方

法应用于其它类似工况不稳、大时滞系统的智能控制中,具有一定的前景。

参考文献:

- [1] 陈耀军,许东来. 燃气锅炉燃烧控制及网络管理研究 [D]. 北京: 北京工业大学,2003.
CHEN Yao-jun, XU Dong-lai. The research of gas boiler combustion control and network management [J]. Beijing: Beijing University of Technology Mechanical Manufacturing and Automation,2003.
- [2] 张国忠. 智能控制系统及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社,2007.
ZHANG Guo-zhong. The intelligent control system and its application. [M]. Beijing: China Electric Power Press,2007.
- [3] 张克良,家 群. 基于模糊神经网络的锅炉燃烧控制系统研究 [J]. 控制理论与控制工程,2004: 1 - 24.
ZHANG Ke-liang, JIA Qun. The research of the boiler combustion control system based on fuzzy neural network [J]. Control Theory and Control Engineering,2004: 1 - 24.
- [4] 张振兴,丁 宝. 燃气热水锅炉智能控制系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2006.
ZHANG Zhen-xing, DING Bao. The research of the intelligent control system of the gas hot water boiler [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2006.
- [5] 杨长亮,詹慧琴. 基于模糊 PID 控制的热热水锅炉燃烧控制系统的研究 [D]. 成都: 成都电子科技大学,2010.
YANG Chang-liang, ZHAN hui-qin. The research of the hot water boiler combustion control system based on Fuzzy PID Control [D]. Chendu: University of Electronic,2010.

(陈 滨 编辑)



新技术、新工艺

9F - 3 热电联产项目在进行中

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.03.026

据《Gas Turbine World》2013 年 11 - 12 月刊报道,Iberdrola Ingenieria 已授权 GE 供应 260 MW 的 9F - 3 燃气轮机,用于为 Vattenfal 建造的利赫特费尔德热电联产 (CHP) 装置。

该装置将供应柏林西南部 300 MW 电力和用于区域供热的 225 MW 热功率。在计划得到批准后,该项目的土建工作即开始。

Iberdrola 负责该项目的整个开发,包括设计、工程、采购、施工、装配和新设备的试运行。新的热电联产装置将代替从 1974 年起运行的热电厂。

9F - 3 燃气轮机的 ISO 基本负荷额定功率为 298.2 MW,热耗率为 9 342 kJ/kWh(38.5% 效率)。

该装置预期在 2014 年 2 月开始建造,并且将在 2016 年 12 月开始运行。

(吉桂明 摘译)

superheating degree of the wet steam at the inlet and in the meantime, to choose proper inlet conditions can avoid the formation of aerodynamic shock waves in the condensation zone. Doing so can not only decrease the energy loss in the flow and enhance the work-doing efficiency but also lessen and postpone the destruction of blades in the last stage to a certain extent. **Key Words:** steam turbine, wet steam, condensation flow, Laval nozzle

气流床气化炉高(灰)熔点煤气化反应模拟 = **Simulation of the High Ash Melting Point Coal Gasification Reaction in a Gas Flow Bed Gasifier** [刊, 汉] LOU Tong, ZHANG Zhong-xiao, ZHOU Zhi-hao (College of Environment and Architecture, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(3) . - 406 - 411

To depict the kinetic behavior of the coal gasification at a high temperature of domestically-originated coal with a high melting point, with the influence of the high temperature on the coal gasification process being taken into consideration and based on the corrected random pore model, established was a simplified model for gas flow gasifiers and predicted was the relationship among the syngas components at the outlet, carbon conversion rate, residence time, particle diameter and gasification temperature. It has been found that when the residence time has exceeded 1.5 seconds, the syngas components at the outlet will immediately tend to be stable. The water gas conversion reaction will determine the syngas components at the outlet. The carbon conversion rate will increase with an increase of the temperature. When the particle diameter of the pulverized coal has been less than 100 μm , the influence on the gasification reaction speed will be not conspicuous. **Key Words:** coal gasification, kinetic model, simulation, coal with a high melting point, gasification in a gas flow bed

基于智能 PID 控制的燃气锅炉燃烧控制系统研究 = **Study of an Intelligent PID (Proportional, Integral and Differential) Control-based Combustion Control System for Gas-fired Boilers** [刊, 汉] GU Yang-yang, LI Lai-chun, ZHANG Shao-Juan (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(3) . - 412 - 416

With a gas-fired boiler combustion system serving as the object of study, the intelligent PID control algorithm was used to improve its control system. The fuzzy self-adaptive theory was used in combination with the BP neural network theory, genetic algorithm theory and PID control theory to design the control system. By using the software Matlab, a simulation and verification were performed respectively and a contrast with the simulation curves obtained

from the traditional control systems and analysis were conducted. It has been found that the intelligent PID control is obviously superior to the traditional PID control, thus offering a theoretical basis for adopting the intelligent PID controllers in gas-fired boiler combustion control systems in industrial processes. **Key Words:** gas-fired boiler, combustion control system, intelligent PID (proportional, integral and differential) control, traditional PID control

2台600 MW机组烟气汞排放水平及形态比较 = **Comparison of the Mercury Emission Level and Morphology of Flue Gases From Two 600 MW Units** [刊, 汉] SHI Hao-xun (Zhejiang Zheneng Research Institute Co. Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310052) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30 (3). - 417 - 420

By adopting the Ontario-Hydro method and the 30B method, tested and measured were the morphology and distribution of mercury in flue gases from two 600 MW class units equipped with different SCR devices. It can be seen from the measurement results that both mercury emissions concentrations in the flue gases from the tail portions of both units are less than $5 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$, meeting the national current mercury emissions standard $30.5 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$. The difference between the mercury contents of the ash and flue gases at the bottom of the static precipitators of the two units is relatively big. The mercury content of the ash at the bottom of unit No. 1 takes up 77.6% of the total mercury content, over one time more than that of unit No. 2. The average mercury content at the flue gas discharging port in the tail portion of unit No. 2 occupies 46.7% of the total mercury input while that of unit No. 1 only accounts for 9.6% of the total mercury input. The difference between both units is mainly attributed to the fact that the flying ash in the flue gases from unit No. 1 adsorbs more mercury in the flue gases, therefore, reducing the gas-state mercury emissions. **Key Words:** coal-fired power plant, SCR (selective catalytic reduction), mercury, removal rate

600 MW 机组干式除渣系统优化应用研究 = **Study of the Optimization and Application of a Dry Type Slag Removal System for 600 MW Units** [刊, 汉] ZHENG Wen-guang, ZHU Liang-song, LIU Bo, HU Zhi-yong (Huadian Electric Power Science Research Institute, Hangzhou, China, Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(3). - 421 - 425

An optimization and applied experiment were performed of a 600 MW unit dry type slag removal system in a power plant. Through measuring the exhaust flue gas temperature of the boilers, carbon content of flying ash, carbon content of slag, temperature of the air cooling the slag when entering into the furnace, slag temperature and the quantity of