

# 智能控制算法对加热炉温度控制研究

孙奉昌, 乐 恺, 姜泽毅, 张欣欣  
(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 针对当前加热炉温度控制存在的超调量大、震荡频率大等问题, 基于智能控制理论的发展, 将智能控制理论中的专家控制、模糊控制和神经网络控制与 PID 控制相结合, 设计了智能 PID 控制算法, 分别对这几种控制算法进行了数值模拟和实验研究。结果表明, 智能 PID 控制算法的调节效果要明显优于传统的 PID 控制算法, 其中, 模糊自整定 PID 控制算法和模糊免疫 PID 控制算法在加热炉温度控制的应用上较为可行, 神经网络 PID 控制算法也具有很好的发展和应用潜力。

**关 键 词:** 加热炉; PID 控制; 模糊控制; 专家控制; 神经网络控制

中图分类号: TP273; TK39 文献标识码: A

## 引 言

热处理炉和加热炉等工业加热炉窑是大型生产企业的主要耗能设备, 具有惯性大、滞后严重、参数非线性及结构复杂等特点。提高工业加热炉窑的控制水平以降低工业加热炉窑的能耗, 是当今冶金工业控制技术的主要研究方向之一<sup>[1]</sup>。PID 控制由于具有原理简单、适应性强和鲁棒性强等特点, 是迄今为止最通用的控制方法。但随着现代化工业控制品质要求的提高、对象复杂程度的增加, 常规 PID 控制的缺陷逐渐暴露出来, 如对于加热炉这样的时变对象和非线性系统, 传统的 PID 控制算法显得力不从心。因此, 迫切需要加入新的方法来完善控制算法, 目前, 将智能理论与常规 PID 调节相结合的智能控制算法成为工业加热炉窑控制算法的研究热点。

智能控制具有不依赖系统精确数学模型和对参数的变化具有良好鲁棒性等优点, 已引起了研究人员的重点关注, 并在理论分析方面取得了一定成果<sup>[2-3]</sup>。但是在应用到过程控制中, 仍存在较大局限性, 成功实例并不多<sup>[4]</sup>。因此如何完善智能控制

使之在工业中成功应用已成为当务之急。本文以加热炉温度控制为切入点, 分别研究将模糊控制、模糊免疫控制、专家控制和神经网络控制算法与常规 PID 控制算法相结合的智能控制算法。针对加热炉的二阶惯性滞后系统的应用, 采用 MATLAB 对各种算法的控制性能进行了模拟研究<sup>[5]</sup>, 并采用小型 PLC 系统对温度控制进行了实验研究。

## 1 几种智能控制算法的设计

实际的计算机控制中应用最广的增量式 PID 控制算法模型:

$$\Delta u(k) = k \left\{ K_P \Delta e(k) + K_I e(k) T_s + \frac{K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]}{T_s} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ —系统的输出增量;  $\Delta e(k)$ —误差差值;  $e(k)$ —系统当前时刻的误差输入;  $K_P$ 、 $K_I$  和  $K_D$ —系统的比例、积分和微分系数;  $T_s$ —采样时间。

在此模型的基础上, 进行了以下几种智能 PID 控制算法的设计。

### 1.1 专家 PID 控制算法设计

专家系统在知识表达、知识处理和知识运用等方面具有独特效能, 它不仅可以利用现有的理论知识, 而且可以处理各种定性信息, 总结和利用人的经验知识, 能解决那些依靠解析方法所不能解决的问题, 因而受到工程界的极大关注。将专家的经验与常规 PID 相结合的智能控制算法, 模型为:

(1) 当  $|e(k)| > M_1$  时, 控制器的输出应按最大(或最小)输出( $M_1$  为误差设定界限);

(2) 当  $e(k) \Delta e(k) \geq 0$  时, 误差在朝误差绝对值增大的方向变化或未发生变化, 此时分误差较大和较小两种情况;

$$\Delta u(k) = k_1 \left\{ K_P \Delta e(k) + K_I e(k) T_s + \frac{K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]}{T_s} \right\} \quad (k_1 > 1) \quad |e(k)| > M_2$$

$$\Delta u(k) = k_2 \left\{ K_P \Delta e(k) + K_I e(k) T_s + \frac{K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]}{T_s} \right\} \quad (0 < k_2 < 1) \quad |e(k)| < M_2$$

(3) 当  $e(k) \Delta e(k) < 0$ ,  $\Delta e(k) \Delta e(k-1) > 0$  或者  $e(k) = 0$  时, 误差的绝对值朝减小的方向变化或已达到平衡, 控制器的输出保持不变;

(4) 当  $e(k) \Delta e(k) < 0$ ,  $\Delta e(k) \Delta e(k-1) < 0$  时, 误差处于极值状态, 此时分误差较大和较小两种情况:

$$\Delta u(k) = k_1 K_P \Delta e(k) \quad (k_1 > 1) \quad |e(k)| > M_2$$

$$\Delta u(k) = k_2 K_P \Delta e(k) \quad (0 < k_2 < 1) \quad |e(k)| > M_2$$

(5) 当  $|e(k)| \leq \epsilon$  时,  $\Delta u(k) = K_P \Delta e(k) + K_I e(k)$ , 此时误差的绝对值很小, 加入积分以减少稳态误差。

式中:  $k_1$ —增益放大系数;  $k_2$ —抑制系数;  $\epsilon$ —任意小的正实数。  $M_1, M_2, k_1, k_2$  和  $\epsilon$  的值根据实际经验来选取。

### 1.2 模糊 PID 控制算法设计

模糊控制的优点是不要求掌握被控制对象的精确数学模型, 而是根据人工控制规则组织控制决策表决定控制量的大小<sup>[6-9]</sup>。这对于现场难以准确建模的加热炉控制具有突出的优势。此外, 模糊免疫 PID 控制算法中的免疫 PID 控制器是借鉴了生物系统的免疫机理而设计出的一种非线性控制器。基于免疫反馈原理的控制器实际上就是一个非线性 P 控制器, 其比例系数  $K_{PI} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$  随控制器的输出变化而变化, 因此本文分别设计了模糊自整定 PID 控制算法和模糊免疫 PID 控制算法进行研究。

模糊自整定 PID 控制算法主要是找出 PID 3 个参数与  $e$  和  $ec$  之间的模糊关系, 在运行中通过不断检测  $e$  和  $ec$ , 根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线修改, 以满足不同的  $e$  和  $ec$  时对控制参数的不同要求, 总体思路如图 1 所示。

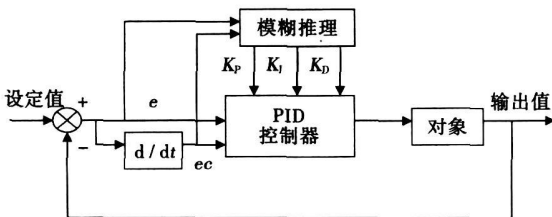


图 1 模糊自整定 PID 控制器的系统框图

图中  $K_P, K_I$  和  $K_D$  分别表示系统的比例、积分和微分系数,  $e$  和  $ec$  为系统的输入误差和误差的变化。

本文设计的模糊免疫 PID 控制算法控制模型为:

$$\Delta u(k) = K_{PI} \left\{ \Delta e(k) + \frac{K_I}{K_P} e(k) T_s + \frac{K_D}{K_P} \times \left[ \frac{\Delta e(k) - \Delta e(k-1)}{T_s} \right] \right\} \quad (2)$$

式中:  $K_{PI} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$ ,  $K = k_1$ —控制反应速度,  $\eta = k_2/k_1$  为控制稳定效果,  $f(*)$ —一个选定的非线性函数, 代表细胞抑制刺激能力的大小。  $K_P, K_I$  和  $K_D$ —系统的比例、积分和微分系数,  $\Delta e(k)$ —误差差值。

### 1.3 神经网络 PID 控制算法设计

神经网络算法以非线性大规模并行处理为主要特征, 以生物神经网络为模拟基础, 试图模拟人的形象思维以及学习和获取知识的能力, 具有学习、记忆、联想、容错并行处理等能力, 已在控制领域得到广泛应用<sup>[10-12]</sup>。在实际的加热炉控制中, 神经网络 PID 控制算法具有推理速度快、跟踪性能好和抗干扰能力强的特点, 具有较强的可行性和实用性。本文采用了在实际中应用较广的单神经元自适应控制进行了设计, 控制算法为:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 (w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)|) x_i(k) \quad (3)$$

其中:

$$w_1(k) = w_1(k-1) + \eta_{pz}(k) u(k) x_1(k)$$

$$w_2(k) = w_2(k-1) + \eta_{iz}(k) u(k) x_2(k) \quad (4)$$

$$w_3(k) = w_3(k-1) + \eta_{dz}(k) u(k) x_3(k)$$

式中:  $x_1(k) = e(k) - e(k-1)$ ;  $x_2(k) = e(k)$ ;  $x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$ ;  $z(k) = e(k)$ ;  $\eta_p, \eta_i, \eta_d$ —比例、积分、微分的学习速率;  $K$ —神经元的比例系数,  $K > 0$ 。

## 2 模拟结果与分析

工业加热炉是典型的具有纯滞后、强耦合、非线性特点的惯性系统<sup>[13]</sup>, 本文将其作为二阶惯性纯滞后环节进行模拟研究<sup>[14-15]</sup>, 取该环节的传递函数为:  $G(s) = \frac{4e^{-2}}{5s^2 + 10s + 1}$ , 采样时间为 0.5 s, 仿真时间为 100 s。将传递函数进行 z 变换后得:

$$G(z) = z^{-4} \frac{0.07329 + 0.05262z}{z^2 - 1.336z + 0.3679} \quad (5)$$

本文应用 MATLAB, 采用前面设计的几种智能 PID 控制算法对加热炉炉温控制进行了模拟研究,

其初始参数取值如表 1 所示, 仿真结果分别如图 2 ~ 图 5 所示。

表 1 算法的初始控制参数取值

算法	$K_P$	$K_I$	$K_D$	参数
常规 PID 算法	0.6	0.1	0.5	增益系数 1.2, 抑制系数 0.8 输入量分为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大 7 部分 输出量分为正、负、零 3 部分 神经元的比例系数为 1.6
专家 PID 算法	0.6	0.1	0.5	
模糊自整定 PID 算法	0.6	0.1	0.5	
模糊免疫 PID 算法	0.6	0.1	0.5	
神经 PID 算法	0.6	0.1	0.5	

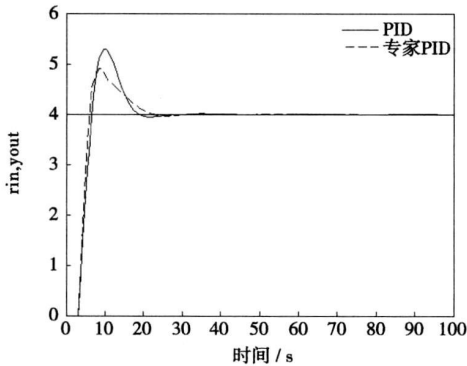


图 2 专家 PID 与常规 PID 算法的比较

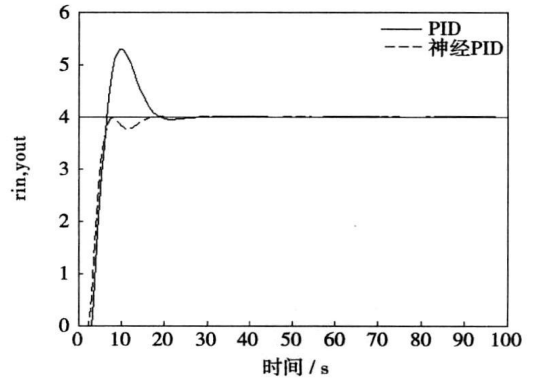


图 5 神经 PID 与常规 PID 算法的比较

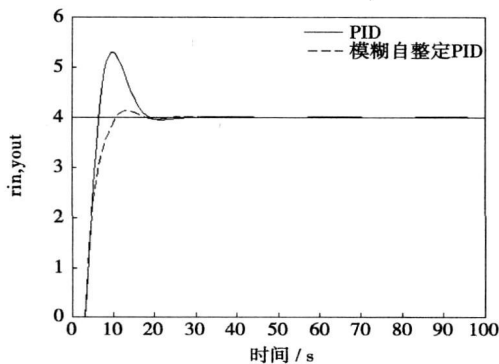


图 3 模糊自整定 PID 与常规 PID 算法的比较

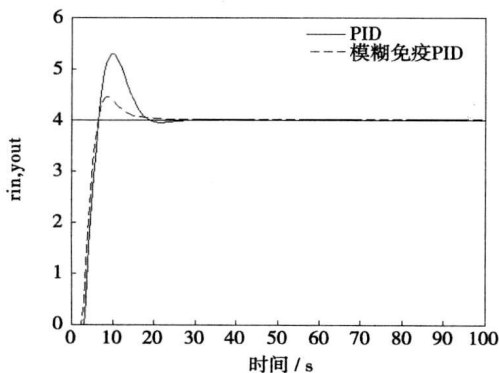


图 4 模糊免疫 PID 与常规 PID 算法的比较

从图 2 ~ 图 5 中可以得出表 2 的结论。

表 2 常规 PID 算法与智能 PID 算法的性能比较结果

算法	超调量	调节时间	结论
常规 PID 算法	大	多	
专家 PID 算法	减小	减少	需较多经验来指导
模糊自整定 PID 算法	明显减小	减少	简单易行, 较适合工程应用
模糊免疫 PID 算法	明显减小	减少	算法简单, 容易实现
神经 PID 算法	大大减小	减少	需要大量实验来确定参数

### 3 实验研究、结果分析与讨论

为了验证设计的算法对加热炉炉温的实际控制性能, 采用研华公司开发的 LABS1000 套件, 通过控制一个密闭小空间的温度进行了实验研究。密闭空间的升温通过控制水泥热电阻两端的电压来实现, 而降温是通过控制风扇转速来实现, 温度通过热电偶测量。

实验中密闭空间的温度的给定值设为 33 ℃, 分别采用上述设计的智能策略进行了温度控制实验, 所设计的算法的初始控制参数取值如表 3 所示, 实验结果分别如图 6 ~ 图 9 所示。

表 3 算法的初始控制参数取值

算法	$K_p$	$K_i$	$K_d$	参数(最大输出限定为 10 V)
常规 PID 算法	3.0	0.3	0.4	
专家 PID 算法	3.0	0.3	0.4	增益系数 1.5, 抑制系数 0.6
模糊自整定 PID 算法	3.0	0.3	0.4	输入量分为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大 7 部分
模糊免疫 PID 算法	3.0	0.3	0.4	输出量分为正、负、零 3 部分
神经 PID 算法	3.0	0.3	0.4	神经元的比例系数为 10.0

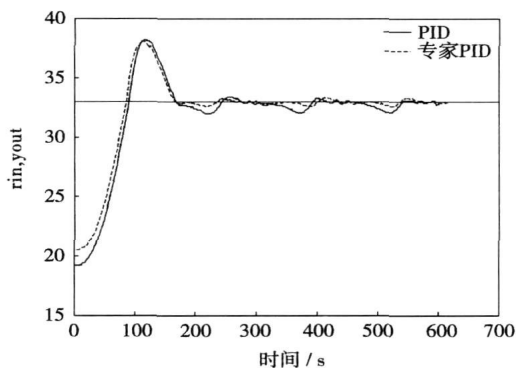


图 6 专家 PID 与常规 PID 的实验数据图

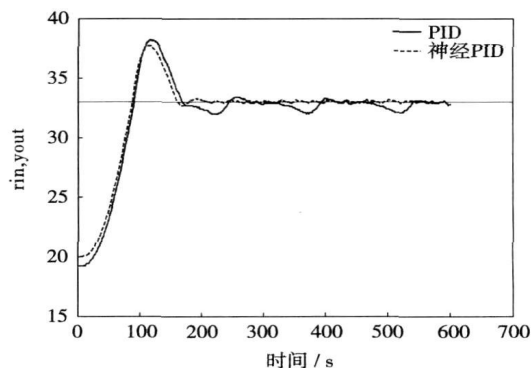


图 9 神经 PID 与常规 PID 的实验数据图

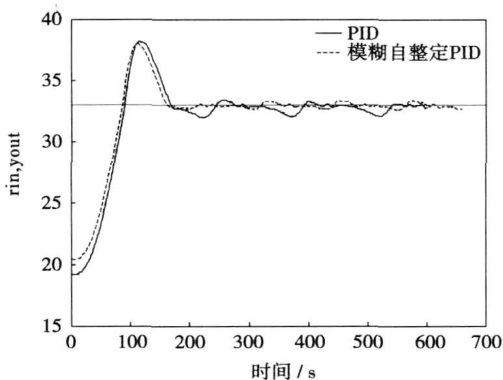


图 7 模糊自整定 PID 与常规 PID 的实验数据图

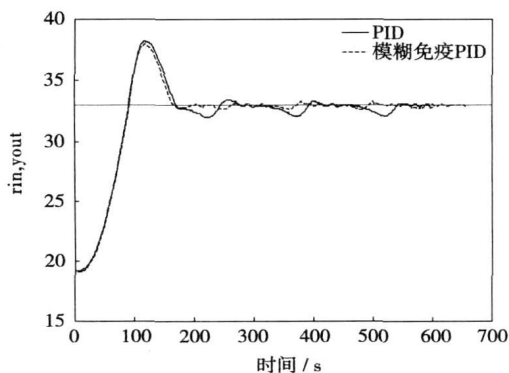


图 8 模糊免疫 PID 与常规 PID 的实验数据图

该实验结果表明专家 PID 算法比传统的 PID 调节相比振荡频率明显下降, 超调量没有明显变化; 而采用模糊自整定 PID 算法, 调节时间变短, 超调量有所下降, 且稳定性更好; 采用模糊免疫 PID 算法则超调量下降幅度最明显, 稳定性也更高。

在实际的加热炉控制中, 根据温度控制的要求, 要力求算法设计的简单、可行、抗干扰强, 适应环境的变化。专家系统在很大程度上需要专家的经验 and 知识来进行操作, 在对加热炉的特性了解不是很多的情况下, 难以设计出令人满意的算法。而模糊自整定和模糊免疫算法则充分利用了其不依赖于对象的精确数学模型, 鲁棒性强等特点, 使设计者很容易设计出满意的算法。由于模糊自整定 PID 控制算法能对比例、积分和微分 3 个参数同时进行整定, 其实际控制效果要比模糊免疫 PID 控制算法效果更好, 但这同时也增加了程序的复杂性。采用神经 PID 算法超调量下降, 震荡频率明显下降, 调节时间也变短, 但在算法的设计运行中  $K$  值(神经元的比例系数)的变化对实验结果的好坏影响很大。

#### 4 结 论

通过对专家 PID 控制、模糊自整定 PID 控制、模糊免疫 PID 控制和神经 PID 控制算法 4 种控制算法

进行了设计, 采用 MATLAB 进行了模拟仿真, 并进行了实际的温度控制实验研究。最终表明模糊自整定 PID 控制算法和模糊免疫 PID 控制算法由于其简单易行和实际控制效果良好, 因此在加热炉温度控制上是较为可行的, 神经网络由于其本身所具有的并行处理, 能逼近任意非线性系统等优点, 未来的发展前景也是很大的。本研究结果为智能控制算法在工业炉温度控制的实际应用做出了有益的探索。

#### 参考文献:

- [1] 张凯举, 邵 诚. 钢铁工业加热炉先进控制技术及其发展[J]. 冶金自动化, 2003(1): 11—15.
- [2] 闫永跃, 李庆周, 于树新. 智能 PID 控制综述[J]. PLC & FA, 2006(12): 9—14.
- [3] SANCHEZ EDGAR N, BECERRA HECTOR M, VELEZ CARLOS M. Combining fuzzy PID and regulation control for an autonomous mini-helicopter[J]. Information Sciences, 2007(177): 1999—2022.
- [4] 刘会影, 刘节影. 一种基于模糊神经网络 FNN 在加热炉温度控制中的应用[J]. 冶金设备, 2007, 4(8): 11—14.
- [5] 徐 峰, 李东海, 薛亚丽. 基于 ITAE 指标的 PID 参数整定方法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 206—210.
- [6] 王 萍, 胡广振, 王云川. 轧钢加热炉燃烧过程的双模糊控制策略[J]. 控制工程, 2007, 14(4): 343—349.
- [7] BING CHEN, XIAOPING LIU, SHAOCHENG TONG. Robust fuzzy control of nonlinear systems with input delay[J]. Chaos Solitons and Fractals 2008(37): 894—901.
- [8] MOHAN B M, ARPITA SINHA. Analytical structure and stability analysis of a fuzzy PID controller[J]. Applied Soft Computing, 2008(8): 749—758.
- [9] 马常举, 马伯渊. 基于 MATLAB 的参数模糊自整定 PID 控制器的设计与仿真研究[J]. 虚拟仪器与 EDA 专题, 2007, 10: 20—22.
- [10] 李东海, 吴勇强. 新型非线性 PID 控制器仿真研究[J]. 电子技术与应用, 2000(11): 40—41.
- [11] MEEI LING HUNG, JUI SHENG LIN, JUN JUH YAN. Optimal PID control design for synchronization of delayed discrete chaotic systems[J]. Chaos Solitons & Fractals 2006(35): 781—785.
- [12] KAI WANG, ZHIDONG TENG, HAIJUN JIANG. Adaptive synchronization of neural networks with time-varying delay and distributed delay[J]. Physica A, 2008(387): 631—642.
- [13] GIULIO D EMILIA, ANTONIO MARRA, EMANUELA NATALE. Use of neural networks for quick and accurate auto-tuning of PID controller[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007(23): 170—79.
- [14] 白美卿, 高富强. 关于炉温动态特性的分析[J]. 冶金自动化, 1994, 18(4): 8—10.
- [15] JOSE LUIS GUZMAN, PEDRO GARCIA, TORE HAGGILUND. Interactive tool for analysis of time-delay systems with dead-time compensators[J]. Control Engineering Practice 2007(10): 1—12.

(编辑 滨)

#### 新技术、新工艺

## 汽轮机低压回热系统的改善

据《Теплоэнергетика》2008 年 12 月号报道, 汽轮机回热系统包含低压加热器、除氧器、高压加热器、循环水泵和给水泵。

大量技术—经济性计算表明, 具有 7~9 级加热是合理的。这时, 回热度可能达到 95%。由于采用回热系统, 在经济性提高的总份额中, 低压加热器的贡献达到 50%~55%, 保证其高效的工作是最重要的任务。

分析了提高汽轮机装置低压回热系统经济性的问题。研究表明, 从低压缸抽汽室到加热器的管路流体阻力是低压加热器工作因素。

为了提高低压加热器的工作效率, 必须借助于增加蒸汽管道的流通截面、降低局部损失, 把低压加热器布置在低压缸附近, 应用扩压结构的供汽管等措施降低蒸汽压力损失。

(吉桂明 供稿)

Electric Power Test Academy (Group) Co. Ltd., Kunming, China, Post Code: 650217) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 332 ~ 336

Studied was the influence of temperature, pressure and relative humidity on the air flow measurement in a power plant. For the air and flue gas system of a 300 MW boiler in a power plant in Yunnan Province, the temperature and pressure correction coefficient at various measuring points as well as the maximum deviation value of air flow rate at the inlet caused by the non-uniform mixing of cold and hot air were calculated and the possible deviation of cold and hot air flow measurements caused by refraining from introducing a relative humidity correction coefficient, analyzed. It has been found that an accurate measurement of the air flow rate demands a rational introduction of temperature, pressure and relative humidity correction coefficient. When the air temperature is not higher than 50 °C, the non-introduction of a relative humidity correction coefficient will result in a deviation of 0 ~ 3% in the air measurement of the Yunnan Province power plant. **Key words:** flow rate measurement, temperature, pressure, relative humidity, power plant

智能控制算法对加热炉温度控制研究 = **A Study of the Temperature Control of a Heating Furnace Based on an Intelligent Control Algorithm** [刊, 汉] / SUN Feng-cang, YUE Kai, JIANG Ze-yi, ZHANG Xin-xin (Thermal Energy Department, Beijing University of Science and Technology, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 337 ~ 341

In the light of such problems as a big overshoot and a high oscillation frequency etc. currently existing in the temperature control of a heating furnace, on the basis of the development of intelligent control theory and by combining the expert, fuzzy and neural network control in the above control theory with PID (Proportional-Integral-Differential) control, intelligent PID control algorithms were designed. In addition, a numerical simulation and experimental verification were performed of those control algorithms in question. It has been found that the intelligent PID control algorithm can achieve a control effectiveness obviously superior to that of the traditional PID control algorithm. Among the control algorithms, the fuzzy self-tuning control algorithm and the immune, fuzzy PID control one are relatively feasible for the temperature control of heating furnaces. The neural network PID control algorithm has also a great potential for future development and applications. **Key words:** heating furnace, PID (proportional, integral and differential) control, fuzzy control, expert control, neural network control

燃煤电站锅炉的吹灰策略研究 = **Research on Soot-blowing Tactics for Coal-fired Utility Boilers** [刊, 汉] / OU Zong-xian, YAN Wei-ping, ZHU Yu-dong (College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 342 ~ 346

On the basis of realizing an on-line monitoring of boiler heating surface pollution and an on-line analysis of entropy generation, from the standpoint of securing a safe and stable operation for a boiler and attaining maximum soot blowing benefits, proposed were the basic principles to be followed when implementing soot blowing tactics. According to these basic principles and boiler actual operation characteristics, the optimized soot blowing tactics were formulated, and three soot blowing modes suitable for different heating surfaces, established. Then, the optimized soot blowing tactics were used for the computer-based monitoring system of a coal-fired utility boiler to change the original fixed-time soot blowing mode, thus realizing an optimized soot blowing for various main heating surfaces of the boiler. **Key words:** utility boiler, optimized soot-blowing, soot-blowing tactics, pollution monitoring, entropy generation analysis

脉动热管的流型及流向分析 = **An Analysis of Flow Patterns and Directions of a Pulsating Heat Pipe** [刊, 汉] / LI Jing-tao, LI Zhi-hong, HAN Zhen-xing, LIU Shi (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 347 ~ 351

Through visual tests of three types of pulsating heat pipe with different structures, the flow patterns and directions of the working medium in the heat pipe were studied. The variation range of the liquid filling rate and heat load was widened by