

# 超临界机组燃烧系统的自抗扰控制

管志敏<sup>1</sup>, 林永君<sup>1</sup>, 王兵树<sup>1</sup>, 魏文超<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学自动化系, 河北保定 071003; 2. 保定华仿科技有限公司, 河北保定 071051)

**摘要:** 主要研究新型实用非线性自抗扰控制技术(ADRC)在火电厂燃烧控制系统中的应用。针对火电厂燃烧控制系统的大滞后、大惯性以及动态特性随工况变化的不确定性等特点, 提出了自抗扰燃料量控制方案。采用 600 MW 超临界燃煤机组的燃烧控制系统为被控对象, 在电厂热工过程控制实时仿真平台 STAR-90 上建立模块化的控制器, 分别进行了降负荷、加 10% 扰动和 RB 试验。试验结果表明, 用 ADRC 技术建立的燃料量控制系统与 PID 控制系统相比, ADRC 控制系统具有更好的控制品质和抗干扰性。

**关键词:** 超临界机组; 燃烧系统; 自抗扰控制; STAR-90 仿真平台

中图分类号: TK229; TP273 文献标识码: A

## 引言

超临界发电机组以其热能转换效率高、发电煤耗低、环境污染小、蓄热能力小和对电网的尖峰负荷适应能力强等特点而得到广泛应用, 日益成为我国火力发电的主力机组。单元机组燃烧控制系统是火电厂控制系统中极为重要的一环, 它既关系到负荷、主汽压控制又关系到汽温、水位控制等, 其自动投入运行效果对提高机组自动化水平和热经济性及安全性都有十分重要的意义。

传统 PID 控制器结构简单, 参数调节比较容易, 因而在工业控制中得到了广泛的应用。然而当系统对象的参数变化范围较大或非线性效应显著时, 存在以下问题: (1) 实际问题中, 参考输入量一般不可微, 甚至不连续, 输出的检测量常常存在噪声污染, 因而误差信号通常是不可微的, 其应用受到限制; (2) 通过线性组合的方式常常会引起系统快速性和超调量间的矛盾。

自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, 简称 ADRC)是韩京清研究员在研究分析经典 PID 控制的基础上, 将现代控制理论对控制系统的新认识和现代信号处理技术相结合, 汲取经典 PID 的思想精华, 改进其“简单处理”的缺陷, 构造出的一种新

型实用控制器<sup>[1]</sup>。自抗扰控制把被控对象模型中的未知部分和未知干扰都认为是系统的总扰动, 通过扩张状态观测器对系统总扰动的估计, 进而使用非线性配置形成的控制量来实现对被控对象的控制。由于自抗扰控制技术这种独特的控制思想, 自抗扰控制器对非线性、大惯性、不确定时间滞后的复杂系统具有较好的控制品质, 并具有良好的抗干扰能力, 因此本文提出一种燃烧系统的自抗扰控制方案。

## 1 超临界机组的燃烧控制系统

锅炉燃烧过程自动控制的基本任务是使燃料燃烧所提供的热量适应锅炉负荷的需要, 同时还要保证锅炉安全经济运行。燃烧控制系统是协调控制系统锅炉侧的直接执行级, 是机组的主要控制系统之一。燃烧控制系统包括 4 个子系统: 燃料量控制系统、磨煤机控制系统、风量-氧量控制系统、炉膛压力控制系统<sup>[2]</sup>。

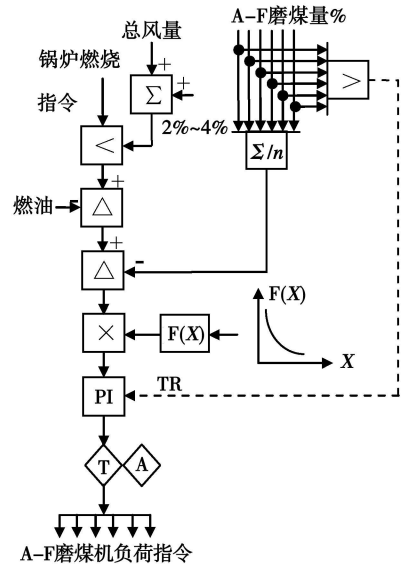


图 1 燃料主控回路

燃料量控制系统的任务是产生给煤量指令以控制燃烧。燃料主控回路将来自锅炉主控的负荷指令

分配至各台运行中的磨煤机负荷控制回路, 通过调节各台磨煤机的给煤量, 使总燃料量满足锅炉负荷指令的要求, 如图 1 所示。

燃料量主控系统的给定值是锅炉主控的输出, 被调量是实际给煤量与燃油量之和。燃料量主控系统的输出作为给煤机转速控制的给定值去调整给煤量。

## 2 火电厂燃烧系统的自抗扰控制方案

### 2.1 自抗扰控制原理

自抗扰控制器利用跟踪微分器 (TD) 安排过渡过程, 给出参考输入信号的各阶导数; 利用扩张状态观测器 (ESO) 估计被控对象的实时运动状况以实现模型和外扰补偿, 并把被控对象简化为“积分器串联型”, 这样就能用状态误差反馈设计出理想的控制器; 非线性组合 (NLSEF) 是安排的过渡过程和对象的状态变量之间误差的非线性控制策略, 是控制“积分器串联型”对象所需的控制量形式。TD, ESO 和 NLSEF 都是由特殊形式的非线性结构组成<sup>[3]</sup>。

由于高阶自抗扰控制器的参数众多而难以调节, 实际应用中多采用低阶自抗扰控制器, 下面以二阶为例简单介绍一下自抗扰控制算法。

以二阶不确定被控对象:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ x_2 = f(x_1, x_2, \omega(t), t) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $f(x_1, x_2, \omega(t), t)$  完全未知, 典型的二阶自抗扰控制器算法以下描述清楚。

#### 2.1.1 跟踪微分器 (TD)

二阶跟踪微分器的微分方程:

$$\begin{cases} v_1 = v_2 \\ v_2 = -fst(v_1, v_2, v(t), r, h_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $h_0$ —滤波因子;  $fst(v_1, v_2, v(t), r, h_0)$ —非线性函数, 其表达式:

$$\begin{cases} d = r \cdot h_0 \\ d_0 = d \cdot h_0 \\ y = v_1 - v + h_0 \cdot v_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} v_2 + \frac{y}{h_0}, & |y| \leq d_0 \\ v_2 + \frac{\text{sign}(y) \cdot (a_0 - d)}{2}, & |y| > d_0 \end{cases} \\ fst = \begin{cases} -r \cdot a / d, & |a| \leq d \\ -r \cdot \text{sign}(a), & |a| > d \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

它的工作原理为: 对于给定的输入信号  $v$ , 经由 TD 后产生两路信号, 一路是给定信号  $v$  的跟踪信号  $v_1$ , 一路是给定信号  $v$  的微分信号  $v_2$ 。对于任意给定的连续、不连续信号  $v$ , TD 都可以给出连续、无超调的跟踪信号。且跟踪的快慢取决于参数  $r$  值,  $r$  越大, 跟踪的越快;  $r$  越小, 跟踪的越慢<sup>[4]</sup>。

因此, TD 不仅可以对给定信号进行预处理安排过渡过程, 而且还可以从不可微信号或含有噪声的信号中合理地提取连续可微的信号。

#### 2.1.2 扩张状态观测器 (ESO)

三阶扩张状态观测器 (ESO) 的微分方程:

$$\begin{cases} \epsilon = z_1 - y \\ z_1 = z_2 - \beta_{01} fal(\epsilon, \alpha_1, \hat{q}) \\ z_2 = z_3 - \beta_{02} fal(\epsilon, \alpha_2, \hat{q}) + bou \\ z_3 = -\beta_{03} fal(\epsilon, \alpha_3, \hat{q}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $fal(\epsilon, \alpha, \delta)$  是非线性函数, 定义:

$$fal(\epsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{\epsilon}{\delta} \alpha, & |\epsilon| \leq \delta \\ |\epsilon|^\alpha \text{sign}(\epsilon), & |\epsilon| > \delta \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $u$ —被控对象的输入信号;  $y$ —被控对象的输出信号, 它们都是 ESO 的输入信号; ESO 的输出信号  $z_3$  是对被控对象的模型作用 (内扰) 和外扰作用的估计信号, 即总干扰量的估计信号。只要合理地选取参数  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$  和  $\beta_{03}$ , ESO 就能给出满意的估计信号, 这是独立于被控对象和外扰作用的观测器<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.3 非线性误差反馈控制律 (NLSEF)

由 TD 产生的跟踪信号  $v_1$  和微分信号  $v_2$  与 ESO 给出的状态估计信号  $z_1, z_2$  来形成两个误差量:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \end{cases} \quad (6)$$

然后选取适当的非线性函数, 根据这两个误差量来产生  $u_0$ :

$$u_0 = \beta_1 fal(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2 fal(e_2, \alpha_2, \delta) \quad (7)$$

式 (7) 称为非线性误差反馈控制律 (NLSEF)。

再根据 ESO 给出的干扰估计信号  $z_3$  和被控对象的已知部分即可形成控制量  $u$ :

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \quad (8)$$

#### 2.1.4 自抗扰控制器 (ADRC)

二阶自抗扰控制器的结构如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 自抗扰控制器的基本结构是由如下三种功能组合而成:

(1) 用跟踪微分器来安排过渡过程并提取其微分信号;

- (2) 用状态观测器估计对象状态和不确定扰动作用;
- (3) 安排的过渡过程与状态估计之间误差的非线性组合和扰动估计量的补偿来生成控制信号。

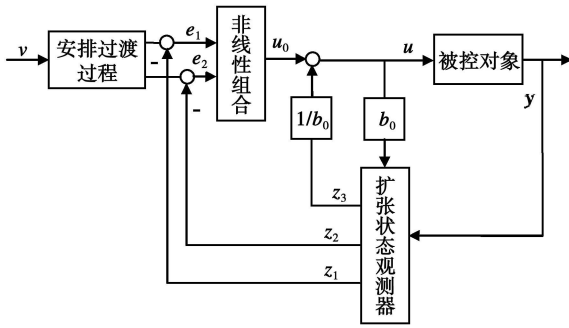


图 2 二阶自抗扰控制器的结构图

这项新的控制技术的核心是把系统的未建模动态和未知外扰作用都归结为对系统的“总扰动”而进行估计并给予补偿, 采用的方法是充分运用特殊的“非线性”效应。其优点有: (1) 不依赖被控对象的具体数学模型; (2) 能实现状态反馈以及模型内扰和不确定外扰补偿; (3) 与传统 PID 控制器相比, 具有更好的稳定性和鲁棒性; (4) 能很好地解决系统快速性和超调量之间的矛盾。

### 2.2 STAR-90 仿真平台

STAR-90 系统是华北电力大学开发的具有国际先进水平的仿真开发平台, 具有先进的仿真建模支撑系统和高精度、全物理过程模块化数学模型, 可以在线修改和扩充模型。其电厂模型软件系统的基础是以电厂设备或局部过程为基本单元和以物理机理(能量、质量、动量平衡)建立的算法。这些设备及局部过程算法经过严格检验并经系统特别处理形成电厂算法库<sup>[6]</sup>。

采用 STAR-90 模块化建模技术所建立的电厂数学模型具有较高的精度即逼近度, 所有电厂参数的动态反映均符合过程规律, 所有自动控制、连锁保护均一一地实现实际电厂控制系统功能。以火电厂电力生产过程为仿真对象的全仿真机, 可以完全复制和再现电厂的运行过程。为控制理论研究提供接近实际过程的试验平台, 对检验各种控制算法的性能具有重要意义。

### 2.3 火电厂燃烧系统的自抗扰控制方案在 STAR-90 上的实现

自抗扰控制技术在 STAR-90 上的实现需将控制器的各个部分进行离散化计算<sup>[7]</sup>, 离散化后的计算形式为:

#### 2.3.1 安排过渡过程

设  $v_0$  为设定值, 跟踪微分器的离散化形式为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h \times v_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \times fst(v_1(k) - v_0, v_2(k), r, h_0) \end{cases}$$

#### 2.3.2 扩张状态观测器的离散化方程

$$\begin{cases} e = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h \times (z_2(k) - \beta_{01}e) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h \times (z_3(k) - \beta_{02}fal(e, \alpha_{01}, \delta) + b_0u(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \times \beta_{03} \times fal(e, \alpha_{02}, \delta) \end{cases}$$

#### 2.3.3 非线性误差反馈律, 即控制量的形成

$$\begin{cases} e_p = v_1(k) - z_1(k), e_d = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0 = K_p fal(e_p, \alpha_p, \hat{\phi}) + K_d fal(e_d, \alpha_d, \hat{q}) \\ u(k) = u_0 - \frac{z_3(k)}{b_0} \end{cases}$$

在 STAR-90 仿真支撑平台上, 先用 C++ 语言编写自抗扰控制技术功能算法模块, 然后通过这些模块搭接成自抗扰控制器。在仿真平台中, 一般需要编写非线性函数  $fal$ ,  $fst$  的模块, 二阶 TD 模块, 非线性误差反馈控制律 NLSF 模块和三阶 ESO 模块。下面我们以三阶 ESO 模块为例进行说明。

算法说明:

三阶 ESO 模块有 4 个输入引脚和 3 个输出引脚, 内部有 5 个参数。输入 IN1、IN2、IN3 和 IN4 分别代表三阶 ESO 方程中的  $u$ ,  $fal(\epsilon, \alpha_1, \delta)$  (一般表达式中为  $\epsilon$ , 可以用非线性函数代替),  $fal(\epsilon, \alpha_2, \delta)$ ,  $fal(\epsilon, \alpha_3, \delta)$ ; 系数 COEF1、COEF2、COEF3、COEF4 和 COEF5 分别代表 ESO 方程中的采样步长, 系数  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$ ; 输出 OUT1、OUT2、OUT3 分别代表 ESO 方程中的输出  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 。

数学描述:

$$\begin{cases} COEF1 = h; COEF2 = \beta_{01}; COEF3 = \beta_{02}; \\ COEF4 = \beta_{03}; COEF5 = b_0; \\ \epsilon(k) = z_1(k) - y(k) \\ IN1 = u(k) \\ IN2 = fal(\epsilon(k), \alpha_1, \delta) \\ IN3 = fal(\epsilon(k), \alpha_2, \delta) \\ IN4 = fal(\epsilon(k), \alpha_3, \delta) \\ OUT1(k) = OUT1(k-1) + COEF1 \times (OUT2(k-1) - COEF2 \times IN2) \\ OUT2(k) = OUT2(k-1) + COEF1 \times (OUT3(k-1) - COEF3 \times IN3 + COEF5 \times IN1) \\ OUT3(k) = OUT3(k-1) - COEF1 \times COEF4 \times IN4 \end{cases}$$

运用建立好的算法模块,就可以在 STAR-90 上搭建出 ADRC 控制器,如图 3 所示。

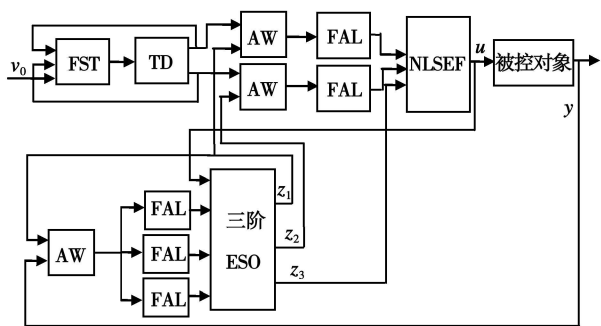


图 3 STAR-90 上模块化的自抗扰控制器

值得注意的是,在原 PID 系统中,设计者对于 PID 控制器的输入进行了非线性处理:在偏差输入之前加了一个非线性模块——函数发生器,其作用是对信号进行死区以及幅值的处理。在 ADRC 模块组态时,没有使用这个模块,这是因为 ADRC 本身就是利用非线性的方法,所以不需要再使用非线性模块对输入信号进行处理。这个改进说明:ADRC 控制器充分运用特殊的“非线性”效应,把系统的未建模动态和未知外扰作用都归结为对系统的“总扰动”而进行估计并给予补偿。

### 3 仿真结果及分析

试验的被控对象采用潮州电厂 600 MW 超临界直流炉机组。机组采用中速磨直吹正压一次风机送粉系统,由此组成的燃烧控制系统的动态特性(调节机构动作后,汽压或锅炉负荷的变化)的滞后和惯性比中间粉仓的锅炉大,其滞后时间约为 60~150 s。对于直流炉而言,由于没有了汽包,煤水比的控制就显得尤为重要。

仿真试验针对超临界机组的燃料量调节主控回路,在 STAR-90 仿真平台上对 PID 控制器(参数已优化)和 ADRC 控制器进行降负荷试验、加 10% 扰动试验和 RB 试验。所观察的主要是煤水比和主汽压力曲线。比较两个控制器的仿真曲线,可以得出两个控制器性能的优劣。

(1) 降负荷试验,600 MW 降到 400 MW,降负荷率 10 MW/min,机组运行 30 min 曲线。

仿真曲线中,两个控制器的主汽压力曲线差不多,而采用 ADRC 控制器的煤水比曲线与采用 PID 控制器的相比,变化幅度小,比较平滑,波动少。降

负荷试验的结果表明:ADRC 控制方案明显优于 PID 控制方案。

(2) 加 10% 的扰动试验,在燃料量主指令加上 10% 的扰动,约 15 s,机组运行 20 min 曲线。

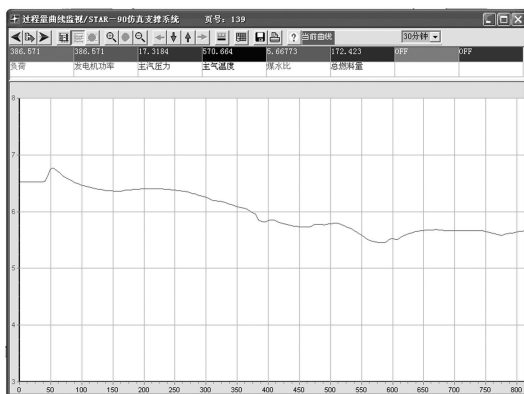


图 4 PID 控制器降负荷时的煤水比曲线



图 5 ADRC 控制器降负荷时的煤水比曲线

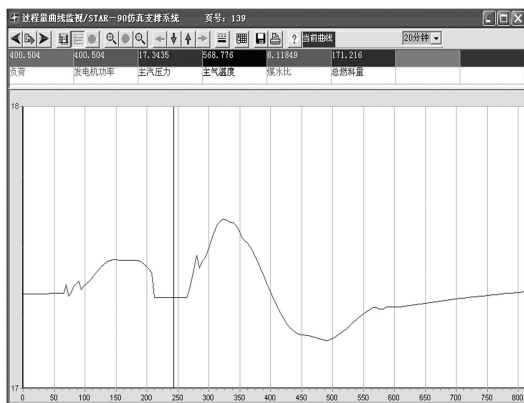


图 6 燃料量主指令加 10% 扰动的主汽压力曲线

图 8,图 9 曲线前部分是 ADRC 控制的,后面是 PID 控制的。由仿真曲线可以看出,在给燃料量主指令加上 10% 的扰动后,PID 控制系统恢复到稳态的时间大约为 7 min,ADRC 控制系统恢复到稳

定状态的时间大约为 1.5 min, 而且 PID 控制下的曲线波动较大。这个仿真曲线表明 ADRC 控制系统比 PID 控制系统具有更强的抗干扰性。

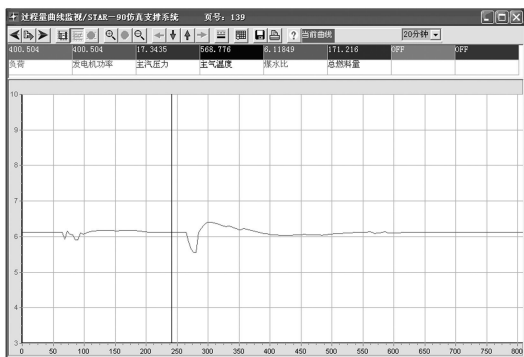


图 7 燃料量主指令加 10% 扰动的煤水比曲线

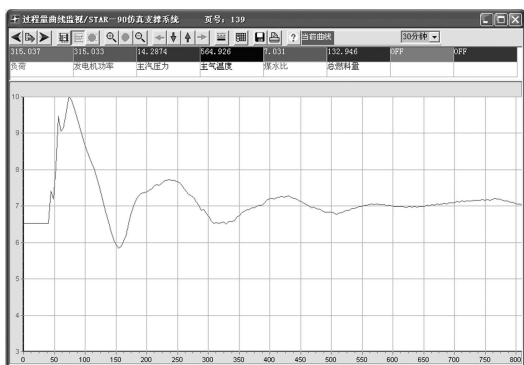


图 8 PID 控制器的 RB 试验时煤水比曲线

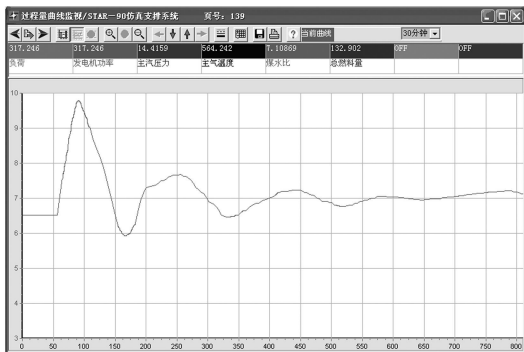


图 9 ADRC 控制器的 RB 试验时煤水比曲线

(3) RB 试验, 本次 RB 试验是跳一台引风机, 试验所用的 600 MW 超临界机组共有两台引风机工作, 跳其中的一台, 机组运行 30 min 曲线。

RB 试验曲线中, 主汽压力曲线差不多, 对于煤水比曲线, ADRC 控制下的煤水比曲线与 PID 的相比, 变化幅度较小。试验表明, ADRC 控制下的机组发生 RB 时, 没有跳出自动状态, 能够很好地控制机

组的运行。

从以上 3 个试验的曲线对 ADRC 和 PID 两个控制系统的比较可以发现, ADRC 的控制效果优于 PID 控制器, 尤其是在 10% 扰动试验中, ADRC 的“自抗扰”功能更是得到明显的体现——ADRC 控制系统恢复到稳定状态的时间要远远小于 PID 控制系统, 并且 RB 试验说明在机组运行时发生 RB 的情况下, ADRC 控制系统也能够很好的控制机组的运行。

## 4 结 论

自抗扰控制 (ADRC) 技术是为了适应数字控制的需要而发展起来的一种新的控制系统综合控制方法<sup>[8]</sup>。用这种技术设计的控制器, 不需要精确的数学模型, 只需要知道模型的阶数即可, 具有超调小、收敛速度快、精度高、抗干扰能力强等特点。ADRC 利用非线性结构从根本上克服了经典 PID 所固有的缺陷, 能有效解决控制对象的模型不确定性、多扰动和时间滞后等问题。

本文将 ADRC 技术应用于燃烧控制系统, 提出了一种全新的燃料量控制方案。在电厂过程仿真平台 STAR-90 上, 针对 PID 控制系统和 ADRC 控制系统分别进行了降负荷、加 10% 扰动和 RB 3 种试验。仿真结果表明, ADRC 控制器对煤水比的控制效果, 尤其是抗扰动的能力, 明显优于常规 PID 方案, 显示出 ADRC 控制方案对于火电厂燃烧系统的有效性和优越性及其实际应用的良好前景。

## 参考文献:

- [1] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
- [2] 朱北恒. 火电厂热工自动化系统试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [4] 要晓梅, 王庆林, 刘文丽, 等. 一般工业对象的二阶自抗扰控制[J]. 控制与决策, 2002, 9(5): 59-62.
- [5] 武利强, 韩京清. 直线型倒立摆的自抗扰控制设计方案[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(5): 665-669.
- [6] STAR-90 电厂仿真支撑系统[Z]. 保定: 华北电力大学仿真控制技术研究中心, 1996.
- [7] STAR-90 仿真支撑系统工程师手册[Z]. 保定: 保定华仿科技有限公司, 2005.
- [8] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007, 1: 24-31.

(编辑 滨)

of the corrugated tube bundles. **Key words:** flow externally sweeping across corrugated tube bundles, forced convection, numerical simulation, intensified heat transfer

电站煤粉锅炉炉内压力波动的非线性特性分析= **Analysis of the Non-linear Characteristics of In-furnace Pressure Fluctuations of a Pulverized-coal-fired Utility Boiler**[刊, 汉] / NIU Wei-ran, QIU Yan, TIAN Mao-cheng (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), LIU Zhi-chao (Thermal Energy Research Institute, Shandong Electric Power Academy, Jinan, China, Post Code: 250021)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 457 ~ 460

The in-furnace process of pulverized-coal-fired utility boilers is a complex non-linear time-dependent one. As a result, to introduce a non-linear analytic method on the basis of the traditional linear analytic technologies is of definite realistic significance. Through a statistical inspection and analysis of the in-furnace pressure signals which are capable of reflecting the in-furnace transient process, it has been determined that the in-furnace pressure fluctuation sequence distribution assumes a fractal one featuring a pointed peak and a wide tail instead of a normal distribution. The unpredictable intermittent leap of pressure caused by the influence of multiple variables constitutes the root cause of the in-furnace pressure fluctuations complying with fractal distribution characteristics. By utilizing the maximal likelihood estimation method, estimated were the fractal distribution parameters of the pressure fluctuation. The calculation results show that the variance of the in-furnace pressure fluctuation signals is of no statistical significance. By using the classic R/S statistical tool, the Hurst exponent of the in-furnace pressure fluctuation sequence was calculated and the relationship between the in-furnace pressure fluctuation condition and the Hurst exponent, analyzed. The foregoing can provide useful guidance for the optimization and adjustment of combustion in boilers. **Key words:** pulverized coal boiler, pressure fluctuation, fractal distribution, Hurst exponent

超临界机组燃烧系统的自抗扰控制= **Active Disturbance-resistant Control of a Combustion System for Supercritical Units**[刊, 汉] / GUAN Zhi-min, LIN Yong-jun, WANG Bing-shu (Automation Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), WEI Wen-chao (Baoding Sino Simu Technology Co. Ltd., Baoding, China, Post Code: 071051)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 461 ~ 465

Mainly studied was the application of novel and practical non-linear active disturbance-resistant control (ADRC) technologies in combustion control systems of thermal power plants. In the light of such specific features of combustion control systems of thermal power plants as a big hysteresis, large inertia and uncertainty of dynamic characteristics changing with operating conditions, an active disturbance-resistant control scheme was presented. With the combustion control system of a 600 MW supercritical coal-fired unit serving as a controlled object, a modular controller was established on a real-time simulation platform STAR-90 for the thermodynamic process control of power plants, and a load reduction, addition of 10% disturbance and RB (Run Back) test were performed respectively. The test results indicate that compared with a PID (Proportional, Integral and Differential) control system, a fuel quantity control system based on ADRC technologies boasts a better control quality and disturbance-resistant ability. **Key words:** supercritical unit, combustion system, self disturbance-resistant control, STAR-90 simulation platform

基于极值搜索控制的电站锅炉在线燃烧优化= **On-line Combustion Optimization of a Utility Boiler Based on an Extremum-search Control**[刊, 汉] / LI Yi-guo, SHEN Jiong (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 466 ~ 469

An on-line combustion optimization method was presented for utility boilers based on an extremum-search control. First, the authors has analyzed the fundamental principle of the extremum-search control and pointed out that its essence lies in