

基于混沌理论的预测 PID 控制器参数优化研究

明学星, 王建国, 吕震中, 于向军

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 现实工业过程时常受到外部干扰并且往往具有慢时变特性, 导致传统 PID 控制难以及时跟踪系统变化克服噪音干扰。对混沌优化理论在控制过程中的应用进行了研究; 将预测控制和 PID 控制器结合运用于再热汽温系统的控制当中, 并采用神经网络作为系统预测模型, 通过混沌优化算法对 PID 参数实行在线优化。计算机仿真试验验证了该算法的有效性, 同传统 PID 控制相比较, 基于混沌理论的 PID 预测控制能够及时跟踪系统变化克服外界扰动, 取得了良好的控制效果, 展现出了很强的鲁棒性能。

关 键 词: 预测控制; PID; 混沌优化; 神经网络; 再热汽温

中图分类号: TP273 文献标识码: A

引 言

再热汽温系统是一个典型的非线性、时变、多变量系统, 它的状态参数与运行工况密切相关。汽温控制的好坏直接影响其热效率的高低。生产过程中往往存在较多的干扰因素, 蒸汽负荷、烟气流量及温度、炉内燃烧工况、送引风情况、二次风和三次风的调整、给水流量压力及温度、受热面积灰及制粉系统启停等均对再热汽温有较大的影响。因此迫切需要设计出具有较好鲁棒性的控制系统, 并能够较快投入自动控制。本文就此对传统 PID 控制器参数的优化进行了研究, 并取得了不错的效果。

1 预测控制的基本原理

预测控制是近年来发展起来的一类基于模型的计算机控制算法, 它不需要具有被控对象精确的数学模型, 而是利用数字计算机的计算能力实行在线的滚动优化计算, 从而取得好的综合控制效果。其基本出发点与传统的 PID 控制不同: 它不仅仅根据现过程和以前过程的输出测量值与设定值的偏差来确定当前的控制输入, 而且还利用预测模型来预估过程未来的偏差值, 并据此滚动确定当前最优输入策略^[1-3], 因此, 从基本思想上看, 预测控制优于

PID 控制。

目前, 预测控制在工业实际应用中受到欢迎, 并得到成功应用, 其主要有以下 3 个基本特征: 预测模型、滚动优化和反馈校正, 如图 1 所示。

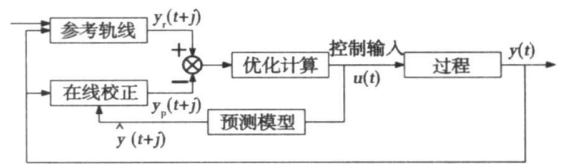


图 1 预测控制原理示意图

预测模型——预测模型的功能是根据被控对象的历史信息和未来的输入, 预测系统的未来输出;

滚动优化——预测控制的最主要特征是在线优化。预测控制这种优化控制算法是通过性能指标 $J = \sum_{j=N_0}^N [y_p(t+j) - y_r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^N \lambda(j) [\Delta u(t+j - 1)]^2$ 最优来确定未来的控制作用;

反馈校正——在预测控制算法中, 采用检测实际输出与模型输出之间的误差进行反馈校正来校正预测模型和实际对象模型的失配, 使滚动优化建立在预测模型输出误差反馈校正的基础上, 以克服系统中存在的不确定性, 提高系统控制精度和鲁棒性。

2 混沌优化原理

混沌优化直接采用混沌变量进行解空间的遍历搜索, 其基本思想是: 首先使优化变量在相空间中处于混沌状态, 即产生一组与优化变量相同数目的混沌变量, 用类似载波的方式将混沌引入优化变量使其呈现混沌状态, 同时把混沌运动的遍历范围放大到优化变量的取值范围, 然后直接利用混沌变量搜索^[4]。

混沌优化算法中, 混沌变量通过 Logistic 映射产

生, Logistic 映射的形式为:

$$x_{k+1} = \mu \cdot x_k \cdot (1 - x_k) \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: $\mu \in [0, 4]$ 为控制参量, 有限差分方程(式(1))可以看作是一个动力学系统。 μ 值确定后, 由任意初值 $x_0 \in [0, 1]$, 可迭代出一个确定的时间序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 。随着 μ 值的增加, Logistic 映射的稳定解 ($k \rightarrow \infty$ 时的 x_k) 将呈现不同的性质^[9]。

当 $\mu=4$ 时, 系统(式(1))没有稳定解, 是 $[0, 1]$ 区间的满映射, 呈现出完全的混沌状态, 这时, 不论 x_0 在 $(0, 0, 1, 0)$ 取什么值, 迭代时间取多长, 都不会在时间序列 $\{x_k\}$ 中出现任何周期变化的成分。对该时间序列做周期分析, 无任何显著周期成分。

通过对式(1)分析可知, 混沌是存在于非线性动力学系统中的一种较为普遍的现象, 其行为复杂且类似随机, 但存在精致的内在规律性, 是一种“奇异吸引子”, 能把系统的运动吸引并束缚在特定的范围内。混沌介于确定性和随机性之间, 具有丰富的时空动态, 系统动态的演变可导致吸引子的转移。混沌具有下列独特性质:

- (1) 规律性, 即混沌是由确定性的迭代式产生的;
- (2) 随机性, 即混沌具有类似随机变量的杂乱表现; 当 $\mu=4$ 时, Logistic 映射在区间 $[0, 1]$ 内不稳定运动, 其长时间的动态行为将显示随机性质;
- (3) 遍历性: 混沌运动的遍历性指混沌变量能在一定范围内按其自身规律不重复地遍历所有状态, 因此, 利用混沌变量进行优化搜索无疑能跳出局部最优;
- (4) 对初始条件的敏感性: 初值 x_0 的微小变化将导致序列 $\{x_n\}$ 远期行为的巨大差异。

因为混沌运动具有上述独特的动力学特性, 基于混沌的搜索技术无疑会比其它随机搜索更具优越性。

由式(1)Logistic 映射方程, 本文利用 $\mu=4$ 时的 Logistic 映射混沌不变集的上述特性搜索问题的最优解。若需优化 m 个参数, 相当于在 m 维空间中确定一个使目标函数值最小的点, 因此需要任意设定 $(0, 1)$ 区间 m 个相异的初值(不能为方程(式(1))的不动点 $0, 0.25, 0.5, 0.75$), 用 m 个独立的 Logistic 映射来产生优化空间中点的 m 个坐标分量, 该点称为混沌向量, 由于混沌向量中的每一个坐标分量都能在 $(0, 1)$ 中稠密, 所以这样产生的点将能在 m 维单位超立方体中稠密。也就是说, 这些点的序列能够以任意精度逼近超立方体中的所有点, 当然也能

以任意精度逼近超立方体中的全局最优解, 根据上述分析, Logistic 混沌模型可以用于求解连续最优化问题。

与一般启发式搜索算法相比, 混沌优化不需要启发信息, 直接采用混沌变量进行搜索, 搜索过程按混沌运动自身的规律进行, 不需要象有些随机优化方法那样通过按某种概率接受“劣化”解的方式来跳出局部最优解, 因此混沌优化方法更容易跳出局部最优点, 搜索效率高, 适合于全局优化搜索, 并且它不要求优化问题模型具有连续性和可微性。混沌优化算法都是利用 Logistic 映射作为混沌序列发生器, 一次只处理或构造一个解, 是以单个解作为每次迭代中进行下次搜索的基础, 保持目前所发现的最好解并试图改善它, 这样做从直观上看是正确的并且相当简单, 通常也很有效。

3 再热汽温系统预测 PID 参数混沌优化

基于经典控制理论的 PID 控制方法已经广泛用于实际生产过程的控制, 它具有算法简单、参数调整方便、鲁棒性强和抗高频干扰强的优点。而预测控制由于具有预测模型、滚动优化、反馈校正 3 个主要特征, 具有可直接处理纯滞后的被控对象、跟踪性能良好和对模型失配有较强鲁棒性的特点。本文将预测控制与 PID 控制结构结合起来, 构造具有 PID 结构的预测 PID 控制器, 既具有 PID 控制器抗干扰能力强、参数选择工程背景强的特点, 又兼顾了控制的鲁棒性和抗干扰性。

预测 PID 控制是一种自适应控制算法, 是在线参数估计和控制器参数在线调整两者的有机结合, 其实质是基于预测控制思想的自适应 PID 控制。这种控制算法是先预测系统未来的输出状态, 再去确定当前时刻的控制动作, 即先预测后控制, 控制动作具有明显预见性, PID 参数又可进行自适应调节, 明显优于仅根据以往信息反馈产生控制动作的经典反馈控制系统。

预测 PID 控制器参数的在线调整, 实际上是一个非线性在线优化问题, 即根据性能指标对参数 K_P, K_I, K_D 优化。而混沌优化算法易跳出局部最优解, 搜索效率高, 适合于全局优化搜索, 无须优化问题具有连续性和可微性。因此, 将混沌优化算法并用于预测 PID 控制器参数 K_P, K_I, K_D 的在线调整, 使之自动适应对象的变化, 系统将始终处于最佳控制状态。控制器性能的好坏, 可通过被控对象的输出响应来评价。

本文采用神经网络模型来预测系统未来的输出状态, 经过用模型输出误差进行反馈校正后, 再与参考输入轨迹进行比较, 应用二次型指标函数进行滚动优化, 然后再计算 K_P, K_I, K_D , 得到当前时刻应加于系统的控制动作而完成整个控制循环。

3.1 神经网络预测模型

工业过程中, 被控对象常表现出非线性特性, 而对于一般的非线性系统, 很难得到精确的模型并进行多步预测, 对于研究非线性预测 PID 控制是非常不利的。神经网络能以任意精度逼近任意连续函数, 用神经网络描述非线性系统, 可以利用实际的输入输出数据, 通过学习和训练来逼近非线性系统, 将其作为模型辨识和预报的工具, 来研究非线性系统预测 PID 控制, 应该说是解决这一问题的一个有效途径^[6]。

非线性系统的递推多步预测模型可表示为:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+1) &= f(y(t-m+1), y(t-m+2), \\ &\dots, y(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

利用式(2)进行递推可得到 d 步超前预测:

$$\hat{y}(t+d) = f(\hat{y}(t+d-1-m+1), \hat{y}(t+d-1-m+2), \dots, \hat{y}(t+d-1)) \quad (3)$$

式中: $\hat{y}(t+i) = \begin{cases} \hat{y}(t+i), & 1 \leq i \leq d-1 \\ y(t+i), & i \leq 0 \end{cases}$
式(3)使用了 t 时刻以后的预测值 $\hat{y}(t+i), 1 \leq i \leq d-1$ 。对于 t 时刻和 t 时刻以前的预测值, 显然可以用其真实值来代替, 即 $\hat{y}(t+i) = y(t+i)$, 其中 $i \leq 0$ 。

设预测时域为 N_1 , 则有:

$$\hat{y}(t+i) = f(\hat{y}(t+i-1-m+1), \hat{y}(t+i-1-\tau-m+2), \dots, \hat{y}(t+i-1)) \quad (4)$$

式中: $i = 1, \Lambda, N_1$ 。

3.2 基于混沌优化的滚动优化^[8]

非线性系统预测 PID 控制实际上是一种优化控制算法, 其任务就是使被控对象的输出 $y(t+j)$ 尽可能地靠近 $y_r(t+j)$ 。但它不是采用一个不变的全局最优化目标, 而是采用一种滚动式的优化策略, 反复在线地进行。任意当前时刻其优化性能指标形式为:

$$J = \sum_{j=N_0}^{N_1} [y_p(t+j) - y_r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_1} \lambda(j) [\Delta u \times (t+j-1)]^2 \quad (5)$$

式中: $\Delta u(t+j) = 0, j = N_u, \Lambda; N_1$ 表示在 N_u 步以后控制量将不再变化。 N_0 表示最小预测时域长度, 通常取为 $N_0 = 1$, 如果已知系统时延 d 时, 取 $N_0 =$

$d; N_1$ —最大预测时域长度, 为了使滚动优化具有意义, 应使 N_1 包括被控对象的真实动态部分, 一般取 N_1 接近于系统的上升时间; N_u —控制时域长度, 一般应有 $N_u < N_1; \lambda_j$ —输出预测误差与控制增量加权系数序列, 一般均取为常值; $y_r(t+j)$ —设定的参考轨迹。

将指标函数式(5)以向量形式表示为:

$$J = \epsilon [(Y_p(t+1) - Y_r(t+1))^T (Y_p(t+1) - Y_r(t+1)) + \lambda U^T(t) U(t)] \quad (6)$$

式中: 定义参考输入矢量为 $Y_r(t+1)$, $U(t)$ 为控制量变化矢量:

$$Y_r(t+1) = [y_r(t+1), \Lambda, y_r(t+N_1)]^T \quad (7)$$

$$U(t) = [\Delta u(t), \Lambda, \Delta u(t+N_u-1)]^T \quad (8)$$

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (9)$$

考虑如下位置式 PID 控制器结构:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \sum_{j=0}^t e(j) + K_D [e(t) - e(t-1)] \quad (10)$$

$$e(t) = y_r(t) - y_p(t) \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可得:

$$\Delta u(t) = K_P [e(t) - e(t-1)] + K_I e(t) + K_D \times [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \quad (12)$$

式中: $y_r(t)$ —输出的设定值; K_P, K_I, K_D —比例、积分、微分因子。

在控制系统设计和运行过程中, 预测 PID 控制器的参数取值的好坏, 直接影响到系统运行的品质。由式(9)~式(12)可见, 性能指标 J 与控制器参数之间存在复杂的非线性关系, 所以, 滚动优化的任务就是根据性能指标对预测 PID 参数 K_P, K_I, K_D 优化, 求取非线性系统预测 PID 控制的控制律。这实际上是一个非线性在线优化问题, 该非线性优化问题可能存在大量局部极小, 用传统的确定性优化方法易于陷入局部极小, 只有给定较好的初始点才有可能求得全局最优解, 而且有的方法还需要导数信息。混沌优化算法无须优化问题具有连续性和可微性, 易于跳出局部最优解, 搜索效率高, 适合于全局优化搜索。因此, 采用混沌算法, 利用混沌变量对控制器参 K_P, K_I, K_D 数进行优化搜索, 将比其它方法更具有优越性。将控制器参数 K_P, K_I, K_D 视为优化变量, 性能指标构成相应的适应度, 便可由混沌优化算法在线优化调整控制器参数。假设性能指标表达式由式(6)确定, 则 PID 参数在线优化问题可以表达为最小化问题:

$$\min J(x_1, x_2, x_3) \quad (13)$$

式中: $x_1=K_P$, $x_2=K_I$, $x_3=K_D$, $x_i \in [a_i, b_i]$, $[a_i, b_i]$ 为优化变量的搜索范围, $i=1, 2, 3$ 。采用常规的 Ziegler—Nichols 方法整定 PID 控制器参数^[7]: K_{p-zn} , K_{I-zn} , K_{D-zn} , 并以此选取混沌优化变量搜索范围: $[a_i, b_i]=[0.5K_{zn}, 1.5K_{zn}]$ 。

4 仿真实验

试验通过 Matlab 来实现对预测 PID 参数混沌优化仿真, 结果如图 2~图 6 所示。

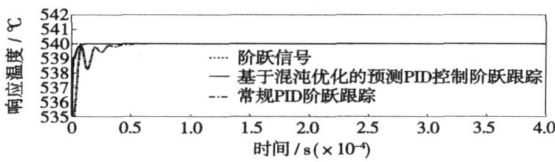


图 2 基于混沌优化的预测 PID 控制和常规 PID 控制方法阶跃跟踪比较

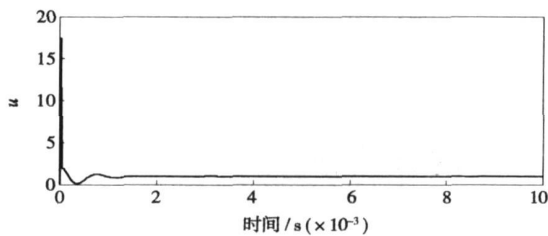


图 3 整定过程中控制器 $u(k)$ 的变化

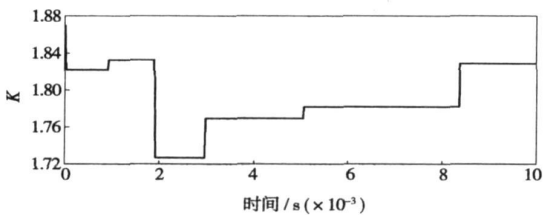


图 4 参数 K_P 自适应整定曲线

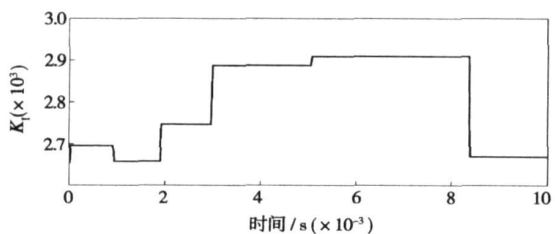


图 5 参数 K_I 自适应整定曲线

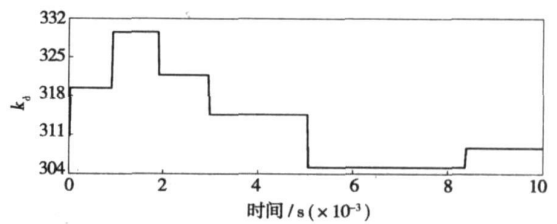


图 6 参数 K_D 自适应整定曲线

图 2 为采用基于混沌优化的预测 PID 控制器和采用 Ziegler—Nichols 方法整定而得到的 PID 控制器在设定值阶跃时的响应。采用常规的 PID 控制器时, 虽然不产生系统稳态误差, 但被控对象存在振荡, 过渡过程时间长等缺陷, 这说明了 PID 控制器的 3 个参数还不是最优设计, 系统的性能指标不是处于最优状态。而采用基于混沌优化的预测 PID 控制器, 既有较快的上升速度, 过渡过程时间较短, 又没有响应超调, 系统的跟踪既平稳又快速地达到了稳态信号, 表现出比常规 PID 控制器更好的控制效果。常规 PID 控制器很难做到两者协调, 当使其参数不产生超调响应时, 往往需要较长的上升时间。与常规 PID 控制比较, 控制效果有所改进, 这是由于本文所采用的预测 PID 控制器参数是利用混沌优化算法来进行在线整定的, 当对象模型结构或参数发生改变时, 控制器参数也会自动调整。

图 3 为采用基于混沌优化的预测 PID 控制器时, PID 整定过程中控制器 $u(k)$ 的变化。图 4~图 6 分别为采用基于混沌优化的预测 PID 控制器时, 控制器可调参数 K_P , K_I , K_D 自适应整定曲线。通过在线调整控制器参数, 使之适应被控对象参数、结构的变化和输入参考信号的变化及未来扰动的影响。

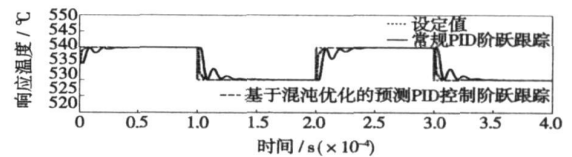


图 7 系统输出跟踪设定值比较

图 7 为当设定值为方波时, 分别采用 PID 控制和基于混沌优化的预测 PID 控制的控制效果。仿真结果表明: 基于混沌优化的预测 PID 控制能很好地跟踪不断变化的设定值, 控制器具有很好的控制效果和较好的鲁棒性, 而常规 PID 控制器跟踪变化的设定值时, 不能达到满意的控制性能, 因此, 基于混沌优化的预测 PID 控制较常规 PID 控制表现出了优

越的性能。

5 结 论

本文对混沌优化理论在预测控制优化中的应用进行了研究,并结合实际热工过程(再热汽温系统)的预测控制进行了仿真试验,仿真结果证实了混沌优化的有效性,并且表现出了比常规 PID 控制更为强大的鲁棒性能,能够克服过程干扰,及时跟踪系统变化,适时调整 PID 控制器参数,取得了不错的控制效果。

参考文献:

[1] 王国玉,韩 璞. 预测控制及其在热工过程控制中的应用[J].

电站系统工程, 2002 18(3): 53-55.

- [2] 周立峰. 预测控制——第一讲: 预测控制的基本原理[J]. 自动化与仪器仪表, 1995 3: 46-49.
- [3] 邵惠鹤. 工业过程高级控制[M]. 第 2 版. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [4] 李 兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论及应用, 1997, 14(4): 613-615.
- [5] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [6] 王 伟. 广义预测控制理论及其应用[M], 北京: 科学出版社, 1998.
- [7] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] 杨迪雄, 李 刚, 程耿东. 非线性函数的混沌优化方法比较研究[J]. 计算力学学报, 2004 21(3): 257-262.

(编辑 滨)

新技术、新产品

利用蒸燃装置对热电站装置的技术改造

《Теплоэнергетика》2006 年 12 月报道, 俄罗斯中央锅炉透平研究所的专家研究了利用并联系统的蒸燃工艺对热电站进行重新匹配动力技术改造的问题。

对技术改造的 4 种方案进行了详细的研究, 结论如下:

(1) 在燃气轮机燃用天然气时, 利用具有燃气轮机上部结构的双流系统是对具有横向联系的任何热电站进行技术重新装备的最有前途的方向。

(2) 在实施双流系统时, 规定在动力锅炉中对余热锅炉出来的蒸汽进行加热的方案是最佳的。其特点是花费最少、工艺方案简单和效率高。

(3) 在利用蒸燃工艺对热电站技术重新装备时, 要合理地分析汽轮机部分在余热利用—冷凝工况中的作用, 并允许增加蒸燃装置在所有的余热利用工况中的功率。

(4) 尽管是针对特定型号汽轮机进行的研究, 所提的方案也能成功地应用于具有其它型号汽轮机的热电站。

(吉桂明 供稿)

concluded that the ratio of fouling thermal resistances of cooling water in the practical operation of a bare tube and spiral-grooved one will be linearly increased with an increase in the product of the area index and efficiency index. However, the linear function expressions in the two zones ($p/e > 5.0$ and $p/e < 5.0$) are different. The particulate fouling ratio assumes a linear ascending relationship with an increase of the efficiency index within only one zone during the experiment.

Key words: bare tube, spiral-grooved tube, fouling characteristics, cooling water, linear relationship

电站锅炉强化传热管沾污特性试验研究 = **Experimental Study of the Fouling Characteristics of Intensified Heat Transfer Tubes of a Utility Boiler** [刊, 汉] / JING Yuan-zhuo, DONG Lei, QIANG Ning (Jinan Baichuan Tongchuang Industrial Co. Ltd., Jinan, China, Post Code: 250101), DONG Yu-ping (College of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 170 ~ 173

Fouling characteristics pertain to important parameters in the design calculation of boilers. Through a test rig set up in the flue of a coal-fired utility boiler, a hot state test of the fouling characteristics of spiral-finned tube bundles has been performed. A fitting correlation formula for the fouling factor, effective thermal coefficient and flue gas speed of spiral-finned tube bundles at different relative pitch values in the different transversal and longitudinal directions has been obtained. The test results show that the value of the fouling factor of spiral-finned tube bundles is an order of magnitude lower than that obtained from “Standard method for thermodynamic calculation of boilers” and the results can be used for the design of boiler heating surfaces and the analysis of their operation. **Key words:** boiler design, fouling characteristics, spiral-finned tube bundle, fouling factor, effective thermal coefficient

电站锅炉参数数据分析 = **Data Analysis of Utility Boiler Parameters** [刊, 汉] / LIU Huan-zhang, LIU Ji-zhen, CHANG Tai-hua, et al (Automation Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 174 ~ 177

In the currently prevailing power-generation process, what attracts attention is no longer limited only to the cost-effectiveness and stability emphasized in the past. Environment protection also plays a decisive role. The authors have taken data analysis as the main method to identify the statistical law governing the relationship among the amount of fuel and air input, load of a turbo-generator unit and the content of various constituents in flue gases, thus realizing an indirect measurement of flue gas constituents through the measurement of fuel and air input as well as plant load. The foregoing can well provide valuable flue-gas reference values for a real-time check and inspection of emissions-compliance performance. **Key words:** utility boiler, flue gas constituent, load, data analysis, emissions performance

基于混沌理论的预测 PID 控制器参数优化研究 = **A Study of the Prediction of Parameter Optimization of a PID Controller Based on Chaotic Theory** [刊, 汉] / MING Xue-xing, WANG Jian-guo, LU Zhen-zhong, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 178 ~ 182

Realistic industrial processes frequently suffer from an external interference, and tend to assume slow and time-variation features, making it difficult for a traditional PID (proportional-integral-differential) controller to timely track the changes of a system and overcome noise interference. The authors have studied the application of chaos-based optimization theory

in various control processes. By the combined use of a prediction control and PID controller in the control of a reheat steam temperature system and with a neural network serving as a system prediction model, an on-line optimization has been performed of PID parameters through a chaos-based optimization algorithm. A computer-based simulation test has verified the effectiveness of the algorithm. Compared with the traditional PID control, the PID prediction control based on chaotic theory is capable of timely tracking system changes and overcoming any outside perturbations. As a result, achieved is a good control effectiveness and the exhibition of a very strong robustness performance. **Key words:** prediction control, PID (proportional-integral-differential) controller, chaos-based optimization, neural network, reheat steam temperature

凝汽器水下在线清洗机器人水动力特性研究 = A Study of Hydrodynamic Characteristics of an Underwater On-line Condenser-cleaning Robot [刊, 汉] / CHEN Ning, WAN Yi, PENG Wei, et al (Power Department, China University of Mining and Technology, Xuzhou, China, Post Code: 221009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 183 ~ 186

By using a numerical simulation and related tests, a study has been performed of the hydrodynamic characteristics of an on-line-cleaning industrial robot destined for the condenser of a 300 MW steam turbine, which is now still under development. It is noted that the robot under discussion will not affect the normal operation of the condenser after being put into the return water chamber of the condenser, but there exist three unfavorable working zones for the operation of the robot. The first zone is located in a region above the condenser partition grate within a height five times of the tube diameter of the partition grate. The second unfavorable zone is situated at the robot's second-stage arm level in a region where the third-stage and second-stage arm form an included angle of 3 to 7 degrees. The third unfavorable zone is in a working region where the manipulator of the robot is pointing to the corner of the condenser. When the robot is working in the above-said unfavorable zones, the vibration of the robot manipulator will increase considerably, thus affecting the fixed location operation. Finally, the authors have conducted an exploratory study of the methods for coping with the above unfavorable zones and noted that an additional installation of a self-adaptive rotary flow-straightening hood on the arm rod of the robot is one of the effective measures. **Key words:** underwater robot, high pressure water jet flow, numerical simulation, vibration

CaO 孔结构分形特性研究 = A Study of Fractal Characteristics of a CaO Porous Structure [刊, 汉] / WANG Chun-bo, CHEN Chuan-min, LI Yong-hua, et al (Energy Source and Power Engineering Institute, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 187 ~ 190

On the basis of fractal theory, an exploratory study has been conducted of the characteristics concerning the porous structure of a modified desulfuration agent. Furthermore, the influence of additive content and calcination temperature on CaO fractal dimension has also been studied. The research results show that the increase of both the additive content and calcination temperature can result in a decrease of CaO fractal dimension. For instance, at a temperature below 900 °C, when the additive content increases from 0.7% to 3.4%, the fractal dimension will decrease by about 0.24. With the additive content being 2%, however, when the calcination temperature has increased from 870 °C to 1 000 °C, the fractal dimension will decrease by about 0.08. In the meantime, the authors have also studied the effectiveness of reflecting the CaO pore diameter distribution by using the fractal dimension. With a decrease of the fractal dimension, the CaO pore diameter distribution will tend to shift to the direction of a bigger average pore diameter, and at the same time have a even bigger pore diameter, indicating that the fractal dimension can reflect exceedingly well the characteristics of CaO pore diameter