

文章编号: 1001-0920(2005)06-0706-03

## 注汽锅炉热效率智能检测监控仪研究

王安娜<sup>1</sup>, 宁伟<sup>2</sup>

(1 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2 首都钢铁公司 高新技术有限公司, 北京 100041)

**摘要:** 提出一种基于智能仪表的注汽锅炉热效率在线检测方法。将自寻优控制技术与模糊控制算法相结合, 实现热效率最优控制; 运用可变步长自寻优算法并引入修正因子可在线优化热效率设定值。所研制的基于微处理器的热效率智能检测监控仪集烟气氧量分析、热效率监测、锅炉燃烧控制、报警、打印多种功能于一身, 能在恶劣环境下在线检测锅炉燃烧参数。实际运行结果表明, 该方法可有效提高注汽锅炉的热效率。

**关键词:** 注汽锅炉; 热效率; 燃烧控制; 自寻优

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

### Intelligence detecting and controlling meter of thermal efficiency of steam-injection boilers

WANG Anna<sup>1</sup>, NING Wei<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 High Technology Corporation, Shougang, Beijing 100041, China Correspondent: WANG Anna, E-mail: wnn1956@163.com)

**Abstract:** The method of online detecting thermal efficiency of steam-injection boilers based on intelligent meter are presented. Auto-tracking optimum algorithm is combined with fuzzy control to achieve thermal efficiency optimizing control. Changing-step and correcting factor are applied to auto-tracking optimum algorithm to online optimize the set-point of thermal efficiency. The intelligent meter based on microprocessor can monitor online combustion parameters in difficult operation. It integrates functions of oxygen content in smoke analysis, thermal efficiency monitor, combustion control of boiler, alarm and printing. The practical result shows that the thermal efficiency is raised.

**Key words:** steam-injected boiler; thermal efficiency; combustion control; auto-tracking optimum

### 1 引言

对锅炉热效率进行实时监测与控制可有效提高能源的利用效率<sup>[1]</sup>。对此, 国内外提出了许多控制方法, 诸如自适应控制、模糊控制、神经网络控制以及专家控制<sup>[2-4]</sup>等。但由于难以建立被控对象的精确数学模型, 且需要同时对多项参数进行检测、分析与控制, 用普通的仪表很难实现上述控制算法。现有的锅炉控制系统大部分是热效率检测与控制分别由不同仪表完成, 如采用氧化锆氧分析仪与锅炉控制系统配合, 或采用进口热效率分析仪与锅炉控制系统配合, 进行锅炉热效率监控, 其成本较高。目前很多

锅炉, 如国内有些油田注汽锅炉, 仍无法在线直接进行热效率检测, 只能每隔一段时间测取数据, 然后离线计算得到锅炉运行的热效率, 不能及时有效地对锅炉进行燃烧控制。

本文以油田注汽锅炉为研究背景, 提出一种基于智能仪表的热效率在线实时检测、控制的方法和应用技术, 研制开发了集检测与控制于一体的注汽锅炉热效率智能检测监控仪。

### 2 热效率智能检测监控仪工作原理

#### 2.1 热效率检测原理

在燃料成分一定的情况下, 烟气各组分与热效

收稿日期: 2004-09-27; 修回日期: 2004-10-26

作者简介: 王安娜(1956—), 女, 辽宁鞍山人, 教授, 从事信号与信息处理等研究; 宁伟(1959—), 男, 北京人, 高级工程师, 从事智能仪表开发研究。

率存在对应关系, 即  $O_2$  (或  $CO_2$ ) 的含量代表着过剩空气系数  $\alpha$  热效率智能监控仪采用查表的方法 参照国外锅炉热效率检测方法及相关文献, 结合注汽锅炉的特点和技术要求, 根据热效率函数  $\eta = f(CO_2, \text{烟温})$ , 建立排烟温度、 $CO_2$  含量与热效率的关系模型; 运用线性插值算法在线提取热效率数值, 建立以天然气和油为燃料的热效率计算模型, 形成二维关系表格 在实际运行中先对相关的各项运行参数 (如锅炉的排烟温度与烟气含氧量) 进行采集和计算, 得出查表所需的数据项, 然后由计算模型得到当前的热效率值, 并采用限幅滤波的方法使采样值更加准确

限幅滤波的做法是将相邻的采样值相减, 求出其增量 (以绝对值表示), 然后与这两次采样允许的最大差值  $\Delta Y$  进行比较, 即: 若  $|Y(k) - Y(k-1)| \leq \Delta Y$ , 则取  $Y(k)$  为采样值; 若  $|Y(k) - Y(k-1)| > \Delta Y$ , 则取  $Y(k-1) \pm \Delta Y$  为采样值 其中  $\Delta Y$  是限幅滤波算法的关键值, 其大小取决于采样周期  $T$  及  $Y$  值的变化动态响应  $\Delta Y$  太大, 不能有效地滤掉干扰信号, 系统的误差会增大;  $\Delta Y$  太小, 又会使采样器对信号的正常变化反应滞后 在本智能传感器中, 由于前向通道处理采用  $V/F$  转换电路输入, 可使最后的值不出现跳跃

### 2.2 热效率监控仪构成及硬件原理

热效率监控仪是由氧化锆一次测氧探头、热电偶测温探头、热效率显示二次仪表等部分组成, 显示和控制部分总体结构如图 1 所示

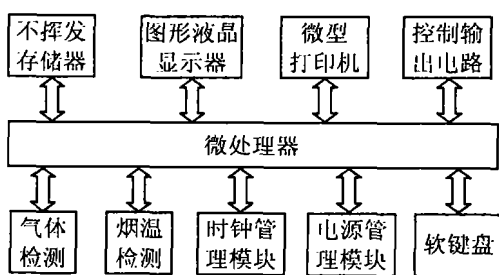


图 1 监控仪硬件系统原理

该系统以 Intel80C196 中央微处理器为核心<sup>[5]</sup>, 用  $240 \times 64$  蓝色点阵液晶显示模块显示各项检测参数及控制图形, 其他组成部分为信号采集电路、控制输出电路、隔离电源电路、数据保护电路及微型打印机等 信号采集电路将氧量和温度信号经放大滤波电路处理后, 进行  $V/F$  转换, 转换成脉冲信号, 以提高信号采集的精度和稳定性; 控制输出电路将温度控制信号通过 CPU 的高速输出口输出, 控制可控硅; 风门开度控制和氧量输出信号分别通过串行 D/A 转换芯片进行转换输出 在本系统中有一时钟

电路, 单片机通过键盘输入电路设定系统时间, 可使用户通过液晶显示屏查看时间, 并记录事件起止时间 此外, 系统复位端看门狗电路的设计, 有效保证了仪表的可靠运行

热效率智能检测监控仪主要有以下功能:

- 1) 用单一的在线探头, 能快速、准确、可靠地测量氧含量;
- 2) 现场可更换测量元件及测温热电偶组件, 易于维护保养;
- 3) 自动测量与显示氧含量、烟气温度、钎头温度、二氧化碳等参数;
- 4) 运用数字滤波、经验数据提取、模糊判断等各种灵活算法, 计算并显示热效率、过剩空气系数等主要运行参数;
- 5) 能自动或手动调节风量、控制氧含量以获得最佳热效率;
- 6) 能定时打印锅炉的主要运行参数;
- 7) 具有氧含量、热效率等过程量的报警功能, 供事故监控与分析用;
- 8) 内置时钟, 提供日历校准功能

## 3 最佳燃烧控制算法设计

### 3.1 热效率在线自寻优控制算法

锅炉热效率与过剩空气系数的非线性关系如图 2 所示 其中  $\eta$  为系统热效率值,

$$\eta = \frac{\text{系统有效热量 } H_D}{\text{系统供给热量 } Q_r} \quad (1)$$

$\alpha$  为过剩空气系数 热效率曲线为单峰向上凸的极值曲线, 具有一个极值点  $A_0(V_0, \eta_0)$ , 当燃料、炉体等工况发生改变时, 热效率曲线的极值点在  $A_0$  (标准燃料、标准炉) 附近——最佳燃烧区漂移, 为实时保证锅炉的最佳燃烧效率, 需要不断寻找这个最佳工作点

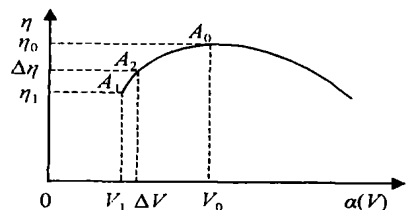


图 2 锅炉热效率与过剩空气系数关系曲线

设锅炉初始燃烧工况在  $A_1(V_1, \eta_1)$  处, 给自变量  $V$  以任意方向变化的一个增量  $\Delta V$ , 系统的工作点将移到一个新的位置  $A_2(V_1 + \Delta V, \eta_1 + \Delta \eta)$ ,  $A_1$  点的梯度为

$$\text{grad}(V_1) = [(\eta_1 + \Delta \eta) - \eta_1] / \Delta V = \Delta \eta / \Delta V \quad (2)$$

若梯度为正, 说明极值在工作点的右边, 下一步应继

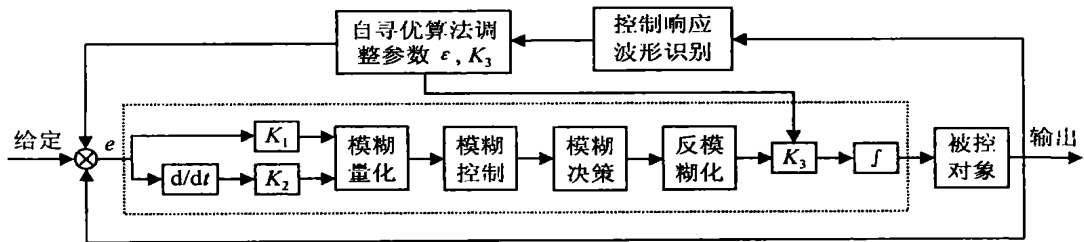


图3 自寻优模糊控制器系统结构

续增加 $v$ ;若梯度为负,说明极值在工作点的左边,下一步应减小 $v$ .如此不断搜索,直到最终找到并稳定在极值点附近.当满足以下条件时:

$$\eta - \eta_{i-1} > 0, \text{ 且 } \eta_{i-1} - \eta < 0,$$

则表示已搜索到最佳工作点,停止寻优.热效率寻优信号在系统中起风量校正作用.

在搜索算法中一旦系统达到相对平稳态势,频繁在线计算热效率以及改变设定值不但不能有效提高优化性能,而且加重了系统负担.因此采用可变优化周期,即在注汽锅炉运行平稳时,使优化周期变长,热效率长期保持相对稳定.在实际控制中,通过调节送风挡板的开度,改变进入锅炉的空气量,从而改变风燃比.在搜索过程中,当遇到在某个方向按固定步长改变风门开度并不能明显提高热效率情况时,采用可变化的优化步长.令变步长因子为 $\epsilon$ .增大优化步长时除以变步长因子;减少优化步长时则乘以变步长因子,以加快风/燃比朝着提高热效率的方向变化.在实际控制中,采用模糊自寻优算法来跟踪这个最优值.

### 3.2 模糊控制策略

在此控制系统中,被控对象是锅炉鼓风机机构的变频器.为使热效率保持在最佳状态,系统不断地对控制响应波形进行识别,并自动寻找最优的热效率值,改变热效率设定值,再用模糊控制算法实现控制<sup>[6-7]</sup>.控制系统的结构如图3所示.

在注汽锅炉燃烧自寻优模糊控制系统中,所考虑的论域有3个:锅炉热效率偏差 $\Delta\eta$ ,偏差变化率 $E_c$ 和送风机挡板开度 $U_c$ .将模糊规则的推理合成运算过程简化为可在线直接查询的模糊控制表,模糊控制规则表中包含156条规则.

在实际控制过程中,首先对每个控制周期从现场采集到的信号进行运算处理,计算偏差 $e_1(k)$ 和 $e_2(k)$  ( $k=0,1,2$ ),再分别乘以量化因子 $K_1$ 和 $K_2$ ,取得相应论域元素表征所需的 $e_{1i}$ 和 $e_{2i}$ ;然后通过查表得到控制量变化 $U_{cij}$ ,再乘以比例因子 $K_3$ ,即得实际控制变量的变化值.

## 4 热效率监控仪应用结果与分析

该热效率监控仪已在辽河油田注汽锅炉热效

率检测与燃烧控制系统中得到应用,并取得了较好的效果.从表1的一组实验监测数据中可以看出,应用该仪表后,锅炉的热效率得到明显的提高.

表1 测算参数综合表

项 目	工况 I	工况 II
排烟处 $O_2$ 含量/%	11.2	8.3
排烟处 $CO_2$ 含量/%	5.4	9.5
排烟处CO含量/%	0.0061	0.0072
排烟温度/	312.1	247.7
过剩空气系数	2.02	1.61
化学不完全燃烧损失/%	0.04	0.04
排烟热损失/%	21.73	13.66
散热损失/%	3.0	3.0
热效率/%	78.95	83.30

注:工况I为应用热效率监控仪调节风量前注汽炉的运行参数;工况II为应用热效率监控仪调节风量后注汽炉的运行参数.

可以看到,应用热效率监控仪后注汽锅炉热效率由原来的78.95%提高到83.3%.

燃料节省率 =

$$\frac{\text{新热效率} - \text{旧热效率}}{\text{新热效率}} \times 100\% =$$

$$\frac{83.3\% - 78.95\%}{83.3\%} \times 100\% = 5.22\%$$

以典型的小型注汽锅炉为例,原来每台锅炉燃烧天然气需 $1072\text{ m}^3/\text{h}$ .使用热效率监控仪后下降为 $1016\text{ m}^3/\text{h}$ ,每小时节省天然气 $56\text{ m}^3$ ,每天节省天然气 $1344\text{ m}^3$ .按每立方米天然气0.6元计算,每月将节约资金为 $1344 \times 30 \times 0.6 = 24192$ 元,年效益可达29万元.由此表明,该仪表对节约能源有显著的效果.

在工况变化较大的情况下,该热效率智能检测监控仪具有快速跟踪能力,使锅炉快速趋向稳定,并且自动进行自寻优控制,在线调节风燃比,使得锅炉的运行不断接近并达到最优工况.

### 参考文献 (References)

- [1] 刘德昌,陈汉平. 锅炉改造技术[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 刘向杰,柴天佑,刘红波. 动力锅炉燃烧系统的模糊控制策略[J]. 自动化学报,1998,24(4):534-538.

(下转712页)

速  $u = 12 \text{ km/d}$ ,  $L_0 = 55.8976 \text{ mg/l}$ ,  $O_s - O_0 = 1.9604 \text{ mg/l}$ ,  $K_1 = 0.51 \text{ d}^{-1}$ ,  $K_2 = 1.15 \text{ d}^{-1}$ . 选取采样周期(步长)为 0.02, 计算点数 = 500 为说明计算误差, 首先根据实际测量的统计分析, 给定函数  $D = O_s - O$ ; 然后, 再通过式(2) 得到  $L$  的真值. 这样, 便可直接得到此条件下有关方法的实际误差.

图1 给出了采用本文方法所得的  $x \sim (O_s - O)$  和  $x \sim L$  拟合曲线(其中: 实线为计算值, 虚线为理论值). 由图1 可见, 采用本文的逼近方法可获得比较准确的拟合结果. 本方法已成功用于延安市延河水的水质判定, 取得了良好的效果.

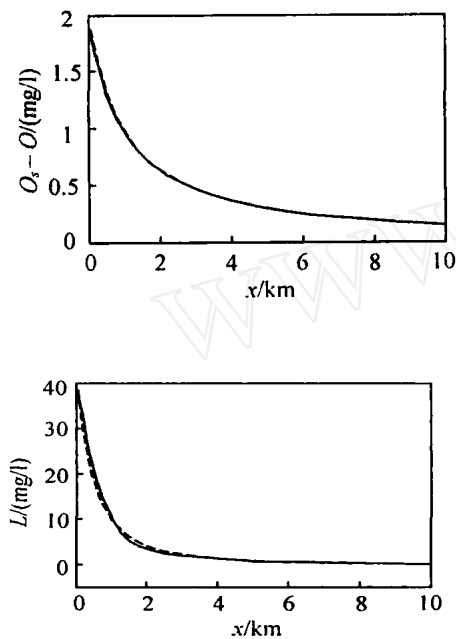


图1 按 Chebyshev 正交级数逼近的结果

## 6 结 语

为减少考虑弥散时 Streeter-Phelps 一维稳态河流水质模型求解方法的误差, 本文给出了以 Chebyshev 正交多项式为基础的求解方法. 根据 Chebyshev 正交多项式近似模型, 采用最小二乘估

计对近似式中的未知参数进行估计. 仿真结果表明, 该方法的精度高于多种微分方程数值计算方法(如龙格-库塔), 不仅可以进一步提高 BOD 的计算精度, 而且能大大提高溶解氧浓度计算结果的准确性. 理论和实际应用结果都表明, 本文方法可用于一维稳态河流水质的预测和检测结果的分析.

## 参考文献 (References)

- [1] Elvira Brankov, Trivikrama Rao S, Steven Porter P. Identification pollution source regions using multiply censored data [J]. *Environment Science & Technology*, 1999, 33(10): 2273-2277.
- [2] 史忠科. 多河段非稳态河流水质模型研究[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(10): 1075-1079.  
(Shi Z K. Multi-section model analysis for non-steady stream water [J]. *Progress in Science*, 2002, 12(10): 1075-1079.)
- [3] 史忠科. 河流水质模型的逼近方法及误差分析[J]. *控制与决策*, 2002, 17(S): 668-671.  
(Shi Z K. Approximation method and error analysis for stream water models [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(S): 668-671.)
- [4] Rifai H S, Bedient P B. Comparison of biodegradation kinetics with an instantaneous reaction model for groundwater [J]. *Water Resource Research*, 1990, 26(4): 637-645.
- [5] Valocchi A J, Malmstead M. Accuracy of operator splitting for advection-diffusion-reaction problems [J]. *Water Resource Research*, 1992, 28(5): 1471-1476.
- [6] Park K, Kuo A Y. A multi-step computation scheme decoupling kinetic processes from physical transport in water quality models [J]. *Water Research*, 1996, 30(10): 2255-2264.
- [7] Park K, Shen J, Kuo A Y. Application of a multi-step computation scheme to an intratidal estuarine water quality model [J]. *Ecological Modelling*, 1998, 110: 281-292.

(上接第708页)

- (Liu X J, Cai T Y, Liu H B. Combustion system of power boiler fuzzy control strategy [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(4): 534-538.)
- [3] 范伊波, 巨林仓, 胡勇, 等. 基于自适应神经网络的过热气温智能控制[J]. *动力工程*, 1998, 18(2): 7-10.  
(Fan Y B, Ju L C, Hu Y, et al. Thermal air temperature intelligent control based on adaptive neural networks [J]. *Power Engineering*, 1998, 18(2): 7-10.)
  - [4] Wu M, Shen D Y. Expert control based on neural networks and mathematical models for the coal

blending process [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(6): 869-872.

- [5] 徐爱卿, 孙涵芳, 盛焕鸣. *单片微型计算机应用和开发系统* [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [6] Ordonez R, Passino K M. Stable multi-input multi-output adaptive fuzzy neural control [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, 3(7): 345-353.
- [7] Shao S H. Fuzzy self-organizing controller and its application for dynamic process [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 26: 151-164.