

文章编号 1004-924X(2004)02-0240-04

电厂锅炉燃烧优化控制系统的设计

李文学¹, 李慧^{1,2}, 张德江¹, 许春光³

- (1. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012;
2. 吉林大学 智能仪器与测控技术研究所, 吉林 长春 130026;
3. 中国电力财务有限公司, 北京 100054)

摘要:介绍了采用神经网络 PID 算法的锅炉燃烧优化控制系统。在现有的 DCS 控制系统的基础上,嵌入上述优化系统,既利用了原有 DCS 控制系统采集的锅炉参数,又利用先进的控制分析软件对数据进行优化处理,达到了燃烧控制优化的目的。实验过程中,对 1 台 3.0×10^5 kW 的燃煤机组,在 150 MK, 220 MK, 259 MK 和 300 MK 等 4 个负荷点做了相关试验,涵盖了机组正常运行范围。实验结果表明,锅炉燃烧效率能提高 1 个百分点。

关键词:锅炉;燃烧控制;模型预测控制

中图分类号: TM621; TK224.11; TP273 **文献标识码:** A

Design of combustion optimization control system for powerplant boilers

LI Wen-xue¹, LI Hui^{1,2}, ZHANG De-jiang¹, XU Chun-guang³

- (1. School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 100012, China;
2. Institute of Intelligent Measurement and Control, Jilin University, Changchun 130062, China;
3. Electric Power Finance Corporation of China, Beijing 100054, China)

Abstract: The incorporation of a boiler combustion optimization control system based on the artificial neural networks PID into the existing DCS control system makes it possible to use the advanced software to optimize the boiler parameters collected using the existing PCS control system. Experiments were made with a 300 MKW coal-burning power generator at four load points of 150 MK, 220 MK, 259 MK and 300 MK covering the normal operating range. Experimental results show that the boiler combustion efficiency can be increased by 1 percent.

Key words: boiler; burning control; forecast control of model

1 引言

电厂是一个复杂的系统,随时可能发生机组负荷和其他干扰因素变化,依靠人工很难使机组控制在最佳运行状态,这其中最典型的的就是锅炉燃烧控制。燃料费用是主要的发电成本,烟气排放又是电厂主要污染源,如何连续熟练地调整风

量,风箱与炉膛的压差和其他变量,始终将锅炉控制在最佳运行状态,对于运行人员的技术水平和工作量的要求都是非常高的。锅炉运行效率是一个复杂的曲面,影响因素很多,而且这些因素随时发生变化,靠运行人员连续寻找曲面的最高点是不可能。事实上,DCS 系统中有几千点的数据,部分用来参与控制,部分仅供运行人员监视机组的运行状态,它们的作用并没有真正发挥出来。

PC 微机是应用最为广泛的计算机,如果采用 PC 微机代替 DCS 的上位机,让优化控制软件运行在 PC 微机上,并开发相应的集成软件平台,对优化控制的推广应用具有十分重要的作用。

2 优化控制系统的总体结构^[1-2]

锅炉燃烧控制系统的基本任务是既要提供适当的热量以适应蒸气负荷的需要,又要保证燃烧的经济性和运行的安全性。为此,燃烧过程控制系统有 3 个控制任务:(1)维持主气压以保证运行的品质;(2)维持最佳的空燃比以保证燃烧的经济性;(3)维持炉膛内具有一定的负压以及保证运行的安全性。因此,燃烧控制系统包括以下几个部分:燃料量控制系统,磨煤机控制系统,风量控制系统,炉膛负压控制系统。附加了软件优化 DCS + IPC 模式优化控制系统的总体结构示意图如图 1。

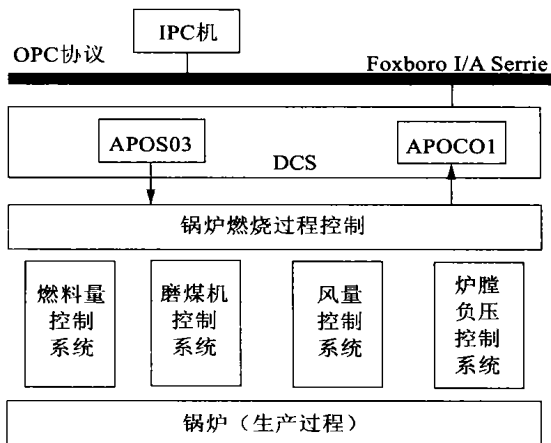


图 1 系统总体结构示意图

Fig.1 Diagram of the system structure

3 控制算法程序设计^[3-8]

3.1 RBF 网络预测模型的建立

图 2 为 RBF 网络预测控制框图,在 RBF 网络预测控制中,首先用 RBF 神经网络建立受控对象的非线性模型作为预测模型。RBF 网络的输入输出维数决定于受控对象输入输出变量数。对于单输入单输出的非线性系统,可以用非线性自回归平均滑动离散模型(NARMAX)来描述,由下式

$$y(k) = f[y(k-1), y(k-2) \dots y(k-n_y), u(k-1), u(k-2) \dots u(k-n_u)] + e(k)$$

式中: $y(k)$, $u(k)$ 和 $e(k)$ 分别表示被控对象的输出,输入和包括噪声在内的误差; $f(\cdot)$ 为一类非线性函数; n_y 和 n_u 分别是输出、输入量的阶数,它由实际系统所决定。

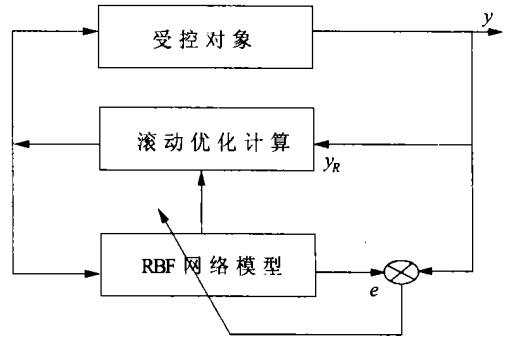


图 2 RBF 网络预测控制框图

Fig.2 Diagram of RBF network forecast

由 RBF 网络建立预测模型,网络输出 $y_R(k+1)$ 和 k 时刻及其以前的输出量 $y(k), y(k+1), \dots, y(k-n_y+1)$ 和控制量 $u(k), u(k+1), \dots, u(k-n_u+1)$ 之间的关系,实际上可以看作单步预测关系,得到:

$$y_R(k+1) = f_R(X)$$

式中:RBF 模型单步预测的输出为

$$y_R(k+1) = f[y(k), y(k-1) \dots y(k-n_y+1), u(k), u(k-1) \dots u(k-n_u+1)]$$

RBF 非线性函数映射关系由式:

$$f_i(x) = \prod_{j=1}^h \exp(-\frac{\|x - c_j\|^2}{\sigma_j^2})$$

式中: h 为隐含层节点数; $i = 1, 2, \dots, m, n$ 为输出层节点数; ij 为隐含层 j 节点与输出层第 i 节点间的权重; c_j 是隐含层节点中心值; σ_j 为待学习权值。

$$X(k+1) =$$

$$[y(k), y(k-1) \dots y(k-n_y+1), u(k), u(k-1) \dots u(k-n_u+1)]$$

且单变量系统的 RBF 网络输出层节点数 $i = 1$, 又记:

$$f_i(x) |_{i=1} \cong f_R[X(k+1)]$$

即:

$$y_R(k+1) = f_R[X(k+1)]$$

对于 RBF 网络踱步预测模型,只要将 NARMAX 模型写成:

$$y_R(k+j) = f_R[X(k+j)]$$

式中

$$X(k+j) = [y(k+j-1) y(k+j-2) \dots y(k+j-n_y), u(k+j-1) u(k+j-2) \dots u(k+j-n_u)]$$

$j = 1, 2, \dots, P, P$ 为预测步数。

3.2 RBF 网络预测控制的优化计算

基于 RBF 神经网络建立的是非线性预测模型,因此相应的预测控制器的滚动优化求解也是一个非线性寻优问题,当系统预测步数为 P 时,系统预测值为:

当 $P > 0$ 时, $y(k+P)$ 均为未知值,可取 $y_R(k+P)$ 替代;当 $P = 0$ 时, $u(k+P)$ 就是所要优化求解的未知量。设 k 时刻的输出值为 $y(k)$,并由 $y_R(k)$ 作为反馈量构成闭环系统,则系统误差:

$$e(k) = y(k) - y_R(k) = y(k) - f_R[X(k)]$$

系统闭环输出的预测值为:

$$y(k+j) = \hat{y}_R(k+j) + e(k) \quad (j = 1, 2, \dots, P)$$

若控制域长度为 $L(L \leq P)$,则:

$$u(k+i) = u(k+L-1)$$

设系统输出给定值为 s ,则预测控制参数轨迹为:

$$y_d(k+j) = c^j y(k) + (1-c)s \quad (j = 1, 2, \dots, P, 0 < c < 1)$$

取优化目标函数为:

$$J = \sum_{j=1}^P [y_R(k+j) - y_d(k+j)]^2 + \sum_{i=1}^L u^2(k+i-1), u(k+i-1) \in U^*$$

式中: U^* 为允许控制域,设 $U^* = [u_{min}, u_{max}]$ 。当 $L = 1$ 时,矢量 U 变为标量 $u(k)$,这时优化计算就成为求 $u(k)$ 使 $J(k)$ 为最小值的问题。当求导不易获得时,可以采用一维的直接寻优算法,如黄金分割法。

(1) 设初始域 $[y_1, y_2] = [u_{min}, u_{max}]$;工程要求精度 ϵ 是一个足够小的值,且 $\epsilon > 0$,求测试域 y_1 和 y_2 :

$$y_1 = y_1 + (1 - 0.618)(y_2 - y_1)$$

并计算目标函数值 $J(y_1)$ 和 $J(y_2)$,且置 $k = 1$ 。

(2) 若 $y_2 - y_1 < \epsilon$,则计算结果得到寻优值 $u(k) = (y_1 + y_2)/2$;否则,当 $J(y_1) > J(y_2)$ 时,转至步骤(3);当 $J(y_1) < J(y_2)$ 时,跳转步骤

(4)。

(3) 令 $y_{k+1} = y_k, y_{k+1} = y_k, y_{k+1} = y_k$,求: $y_{k+1} = y_{k+1} + 0.618(y_{k+1} - y_{k+1})$

并计算目标函数值 $J(y_{k+1})$,而后转至步骤(5)。

(4) 令 $y_{k+1} = y_k, y_{k+1} = y_k, y_{k+1} = y_k$,求: $y_{k+1} = y_{k+1} + (1 - 0.618)(y_{k+1} - y_{k+1})$

并计算目标函数值 $J(y_{k+1})$,转至步骤(6)。

(5) 令 $k = k + 1$,返回步骤(2)。

4 RBF 神经网络在锅炉控制中的应用

该项应用的基本思想是,根据锅炉燃烧效率和节省燃料费用,降低烟气污染物排放,有利于环境保护等综合经济效益为目标的优化目标函数。将描述过程特性的严格稳态机理模型以及质量指标、设备负荷等限制条件作为优化约束,利用了原有 DCS 控制系统采集的锅炉参数,又利用先进的控制分析软件达到对数据的优化处理,为现场的工作人员提供操作指导或直接作为下层控制回路的设定值,达到燃烧控制优化目的。

核心控制是 RBF(径向基函数)模型预测控制算法。它采用了滚动优化策略,即在线反复进行优化计算,滚动实施,使模型畸变、干扰等引起的不确定性及时得到弥补,从而得到较好的动态控制性能。RBF 网络具有较强的非线性逼近能力,能够描述非线性的问题。其网络输出与网络权值之间具有线性关系,采用线性最小二乘算法辨识参数,收敛速度迅速,不存在陷入局部极小点的问题。通过离线辨识,确定 RBF 中心向量,则可以应用递推最小二乘算法实现网络权值的实时在线训练,较好地解决神经网络在实际应用中的模型自校正问题。RBF 神经网络是 7-14-3(输入,隐含,输出层)的模型结构。输入层是一次风,二次风,氧气工作点等影响锅炉效率的因素和负载等扰动量;输出量为排烟温度,送风量等影响锅炉燃烧率的重要指标。

在线控制部分在与 DCS 控制模块交换数据的接口处,预留冗余备份模块。一旦控制系统崩溃或出现不可恢复故障,由第 2 套应急系统接管系统控制,从而保障了对可靠性要求较高的用户的需求。

本系统的在线优化策略如图 3 所示。

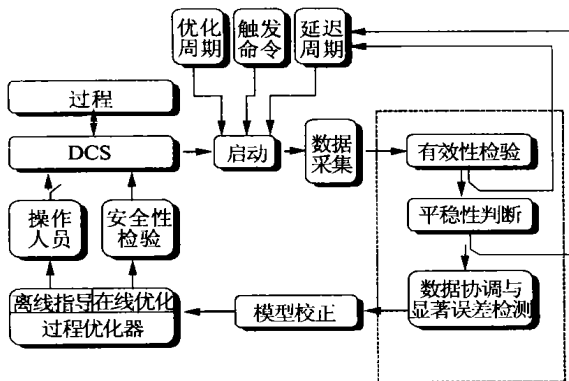


图3 系统在线优化策略框图

Fig.3 Optimized diagram of system on line

5 结束语

该锅炉燃烧优化控制系统已在天津某家电厂实际应用。系统运行后,减少了生产过程中人为因素的影响,不仅提高了锅炉燃烧效率,显著地节省了燃料费用,而且降低了烟气污染物排放,从而有利于环境保护。

整个系统具有安全可靠、性能优良、稳定性好等特点。实现了生产过程控制的自动化、无纸化、网络化,极大地提高了劳动效率,减轻了运行人员的劳动强度,减少了事故,提高了安全生产率,整个系统可广泛应用于燃煤锅炉的燃烧控制中。

参考文献:

- [1] 高伟. 计算机控制系统[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
GAO W. *Computer control system* [M]. Beijing: Electrical Power Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 曾文华. DCS 优化控制系统集成软件平台的研究[J]. 微计算机信息,2000,5:24-26.
ZENG W H. Development of an integrated software platform for optimization control in distributed control system[J]. *Microcomputer Information*, 2000,5:24-26. (in Chinese)
- [3] 郑立. OPC 应用程序入门[M]. 日本 OPC 协会. 1999.
ZHENG L. *OPC application program* [M]. Institute of OPC in Japan. 1999. (in Chinese)
- [4] 华志刚,潘笑,郭菲. 300 mW 机组锅炉给水自动控制系统分析与改进[J]. 电力系统自动化,2002,2:67-69.
HUA ZH G, PAN X, WU F. Analysis and improvement for boiler feedwater automatic control system of 300 mW units[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002,2:67-69. (in Chinese)
- [5] 武宝会. 用 DCS 实现锅炉燃烧优化的闭环控制[J]. 中国电力,2001,10:48-50.
WU B H. To realize closed loop system for optimizing boiler combustion by using DCS[J]. *Electric Power*, 2001,10:48-50. (in Chinese)
- [6] 牛培峰. 大型国产循环流化床锅炉燃烧过程智能控制系统应用研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(12):62-66.
NIU P F. An intelligence combustion on process control system application and research for circulating fluidized bed boilers of giant domestic manufacture[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000,20(12):62-66. (in Chinese)
- [7] 卢秋红,颜国正,韩焱. 基于神经网络算法的故障检测技术[J]. 光学精密工程,2002,10(1):25-30.
LU Q H, YAN G ZH, HAN Y. Fault detecting technology based on neural network algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(1):25-30. (in Chinese)
- [8] 宋洪涛,宾鸿赞. 把神经网络应用于丝杠磨削过程的建模与控制[J]. 光学精密工程,2001,9(4):361-364.
SONG H T, BIN H Z. Model establishment and control of the grinding process of a leadscrew by artificial neural network[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,9(4):361-364. (in Chinese)

作者简介:李文学(1976-),男,吉林延边人,长春工业大学电气与电子工程学院硕士研究生,主要研究方向为智能控制算法的应用和计算机控制理论;

李慧(1973-),女,吉林长春人,长春工业大学电气与电子工程学院讲师,博士研究生,主要研究方向为智能仪器设计与应用、计算机控制理论、自动化应用等。E-mail:lucylihui@sina.com