

文章编号:1000-582X(2013)02-032-05

超临界压力锅炉给水及过热汽温的自适应逆控制

陈 红,王广军,王志杰

(重庆大学 a. 动力工程学院;b. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

摘 要:研究了一种超临界压力锅炉给水及过热汽温的自适应逆控制方法。通过锅炉系统动态特性分析,构造了锅炉给水及过热汽温控制对象逆动力学模型输入向量结构,采用递推最小二乘支持向量机实现逆动力学模型的在线辨识,建立自适应逆控制系统,同时考虑直流锅炉出口汽温以及微过热汽温等对给水量和各级喷水量的共同需要,实现直流锅炉给水及过热汽温的综合控制。仿真试验表明,该控制系统具有良好的控制品质和自适应能力,并能有效地消除汽温分段控制方法中存在的控制量反复振荡现象。

关键词:超临界压力锅炉;自适应逆控制;最小二乘支持向量机;逆动力学模型;辨识
中图分类号:TK172 **文献标志码:**A

Adaptive Inverse Control for Feed Water and Superheated Steam Temperature of Supercritical Pressure Boiler

CHEN Hong, WANG Guangjun, WANG Zhijie

(a. College of Power Engineering, Chongqing University;
b. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An adaptive inverse control method for feed water and superheated steam temperature of supercritical pressure boiler is investigated. Through the analysis of the boiler system's dynamic characteristics, the input vector structure of inverse dynamics model of feed water and superheated steam temperature is constructed. The adaptive inverse control system is realized through on-line identification of inverse dynamic model with recursive least squares support vector machine. In the control process, the demand for feed water and spray water flow to the outlet steam temperature and micro-superheated steam temperature is considered to realize the integrated control of feed water and superheated steam temperature. Simulation results show that this control system has good control performance and adaptability and can void the repeated oscillation phenomena of control variables which appear in present two section control system.

Key words: supercritical pressure boiler; adaptive inverse control; least squares support vector machine; inverse dynamic model; identification

收稿日期:2012-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51176211,50776103);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR10140003)

作者简介:陈红(1970-),女,重庆大学博士,副教授,研究方向为热力系统动态特性及热工过程控制。

王广军(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel) 023-65103512;(E-mail) wangguangjun@cqu.edu.cn。

超临界压力锅炉系统的动态特性复杂,具有十分显著的非线性特性和变参数特性;在超临界压力锅炉系统中,各个控制回路,如锅炉给水控制、过热汽温控制及负荷控制等回路之间存在着很强的非线性耦合关系^[1-4]。

在超临界压力锅炉控制系统中,通常采用分段控制方式分别调整锅炉的给水量和喷水量:第一段用给水量控制微过热汽温(中间点温度)或焓值,通过给水量对燃料量的跟踪,对锅炉出口过热汽温进行粗调;在第一段之后,通过调整各级减温器的喷水量保证各控制点的过热汽温在要求的范围内。分段控制方法结构简单,实现方便,但由于没有考虑各控制回路间的强烈耦合,控制效果难以保证。

文中对超临界压力锅炉汽温对象的典型动态特性进行了简要分析,构造了锅炉给水及过热汽温控制对象逆动力学模型输入向量结构,采用递推最小二乘支持向量机辨识汽温对象逆动力学模型,建立了锅炉给水和汽温的自适应逆控制系统。

1 控制对象逆动力学模型辨识

直流锅炉给水及汽温系统有3个输入变量,即锅炉的给水量 u_1 、一级减温器喷水量 u_2 和二级减温器喷水量 u_3 ;系统的3个输出变量分别为过热器中间点汽温(分离器出口微过热汽温)、屏式过热器出口汽温和锅炉出口汽温。

建立直流锅炉给水及汽温系统逆动力学模型,实现由系统期望输出到控制输入的在线反演,是实现锅炉给水及汽温自适应逆控制的前提。支持向量机(SVM)^[5],已经成为复杂系统辨识建模的有效工具。以最小二乘法代替传统SVM中的二次规划法形成的最小二乘支持向量机(LS-SVM)^[6]已被用于热工对象的在线辨识^[7-9]。文中采用LS-SVM方法建立控制对象的逆动力学模型。对于输入变量 $u_i(k)$,该逆动力学模型为

$$u_i(k) = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} K[x_i(j), x_i(k)] + b_i, i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

其中: N 为样本个数; $x_i(k)$ 为输入变量 u_i 逆动力学模型在 k 时刻的输入向量; b_i 为逆动力学模型的偏移量; $\alpha_{ij} \geq 0$,为Lagrange乘子; $K[\cdot, \cdot]$ 为LS-SVM的核函数。文中采用径向基核函数

$$K(x, y) = \exp\left\{-\frac{\|x - y\|^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (2)$$

对于给定的样本集 $[x_i(j), u_i(j)](j = k-1, k-2, \dots, k-N)$,根据Karush-Kuhn-Tucker条件^[10],

前述的逆动力学模型辨识转化为下列线性方程组求解问题:

$$\begin{bmatrix} 0 & I^T \\ I & \Omega + C^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i \\ \alpha_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

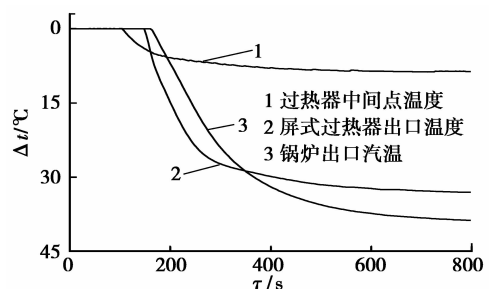
其中: C 为SVM中的正则化参数;

$$\begin{aligned} I &= [1, 1, \dots, 1]^T; \alpha_i = [\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{iN}]^T; \\ u_i &= [u_i(k-1), u_i(k-2), \dots, u_i(k-N)]^T; \\ \Omega &= \{\Omega_{mn}\}_{N \times N}, \Omega_{mn} = K[x_i(m), x_i(n)] \\ &\quad (m, n = k-1, k-2, \dots, k-N). \end{aligned}$$

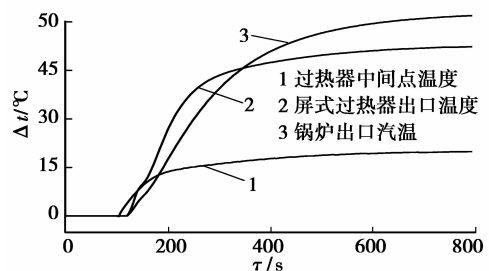
这样,只要给定各逆动力学模型的输入向量 x_i 和样本集,由式(3)在线获得逆动力学模型的偏移量 b_i 和Lagrange乘子 α_{ij} ,即可实现各逆动力学模型的在线辨识。

2 逆动力学模型输入向量确定

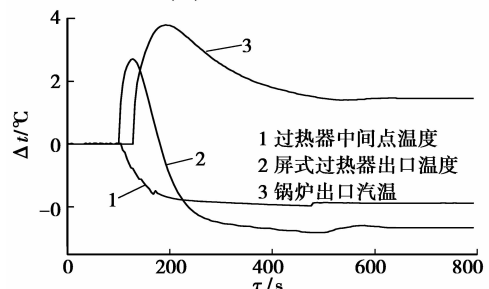
采用文献[11-12]提供的方法建立了直流锅炉系统整体数学模型,相关参数取自DG1900/26.4-II型超临界压力锅炉。该锅炉采用两级喷水,喷水减温器分别装于低过与屏过之间和屏过与高过之间,减温水取自省煤器出口。在 $\tau = 100$ s时刻对锅炉系统施加扰动,对应的锅炉过热汽温响应特性如图1所示。



(a)燃料量阶跃减小10%



(b)给水量阶跃减小10%



(c)喷水量阶跃减小10%

图1 锅炉过热汽温响应

由图 1(a)可见,燃料量及给水量减小时,与过热器中间点汽温 y_1 相比,屏式过热器出口汽温 y_2 和锅炉出口汽温 y_3 的响应虽有一定的延迟但并不明显,而后两者的变化幅度则明显大于过热器中间点汽温的变化幅度。当锅炉给水流量发生变化时,也有类似的结果(见图 1(b))。

由于减温器喷水来自省煤器出口,当减温器的喷水量变化时,流经水冷壁的工质流量几乎瞬时改变,过热器中间点汽温 y_1 和屏式过热器出口汽温 y_2 几乎同时发生变化,而锅炉出口汽温 y_3 的响应则滞后于 y_1 和 y_2 的响应过程。另外,由于受到过热器中间点汽温 y_1 的影响,屏式过热器出口汽温 y_2 和锅炉出口汽温 y_3 在扰动后期将出现明显的回落过程(见图 1(c))。

由仿真试验结果可知,为了改善直流锅炉给水及汽温控制系统的控制效果,在调整锅炉给水流量时,不仅需要考虑到过热器中间点汽温 y_1 的当前状态,还需要考虑锅炉给水流量对锅炉出口汽温 y_3 的影响;同理,在调整过热器各级喷水减温器喷水量时,不仅需要考虑到该级减温器后过热汽温(如 y_2 和 y_3)的当前状态,还需要考虑减温水流量调整对过热器中间点汽温 y_1 的影响。

在建立锅炉给水及汽温自适应控制系统时,控制对象逆动力学模型的输入向量 $x_i(k)$ ($i=1,2,3$) 按下式确定:

$$\left. \begin{aligned} x_1(k) &= [y_1(k+1), y_1(k), y_3(k+1), y_3(k), u_1(k-1)] \\ x_2(k) &= [y_1(k+1), y_1(k), y_2(k+1), y_2(k), u_2(k-1)] \\ x_3(k) &= [y_1(k+1), y_1(k), y_3(k+1), y_3(k), u_3(k-1)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在控制过程中,分别取

$$\left. \begin{aligned} y_1(k+1) &= r_1(k+1) \\ y_2(k+1) &= r_2(k+1) \\ y_3(k+1) &= r_3(k+1) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

其中: r_1, r_2 和 r_3 分别为 y_1, y_2 和 y_3 的目标值。

3 给水和汽温自适应逆控制

给水及过热汽温自适应逆控制系统如图 2 所示。其中 y, u 和 r 分别为控制系统的输出向量、系统的控制向量和系统的目标值向量,即

$$\begin{aligned} y &= [y_1, y_2, y_3]^T, \\ u &= [u_1, u_2, u_3]^T, \\ r &= [r_1, r_2, r_3]^T. \end{aligned}$$

在图 2 中, TDL 为抽头延迟线,对数据进行储存和延迟等操作,产生控制对象逆动力学模型的输入向量 $x_i(k)$ 。

根据获得的 N 个样本,利用 LS-SVM 方法建立 1 组控制对象的逆动力学模型,构造自适应逆控制器。

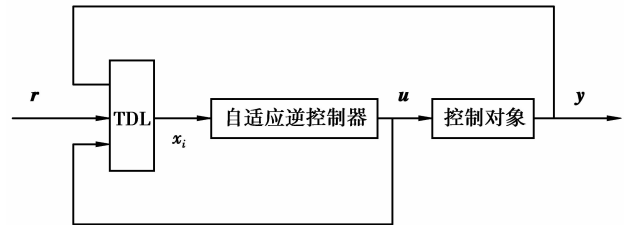


图 2 自适应逆控制系统示意图

4 给水及汽温控制系统仿真

以 DG1900/26.4-II 型超临界压力锅炉为控制对象,通过仿真试验考察给水及过热汽温自适应逆控制系统的性能,并将自适应逆控制系统的控制结果与常规 PID 分段控制方法进行了比较。在 PID 分段控制系统中,由微过热汽温控制锅炉给水量,减温喷水量采取串级 PID 控制方法,一级减温喷水量由屏式过热器出口汽温控制,二级减温喷水量由锅炉出口汽温控制。分段控制系统中各控制器参数来自文献[13]。

图 3~图 6 为 100% 负荷下控制量和被控量的变化过程。在控制过程中,假定 $\tau=100$ s 时锅炉的燃料量阶跃减小 10%。

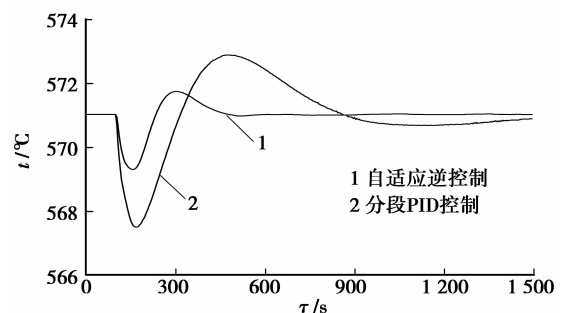


图 3 锅炉出口汽温变化过程 (100% 负荷)

由图 3 可见,在 100% 负荷下,自适应逆控制系统的调节时间和超调量均明显小于分段控制系统调节时间和超调量,控制性能有了明显的改善,汽温均能稳定到给定值。同时,由于各控制量与各被控制量之间存在明显的耦合作用,采用分段控制方法时,各控制量(给水量和各级喷水量)易产生反复振荡现象,而文中建立的自适应逆控制方法能够有效抑制这种反复振荡现象(如图 4~图 7 所示)。

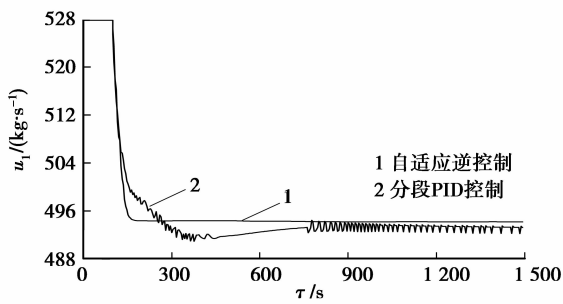


图4 锅炉给水流量变化过程

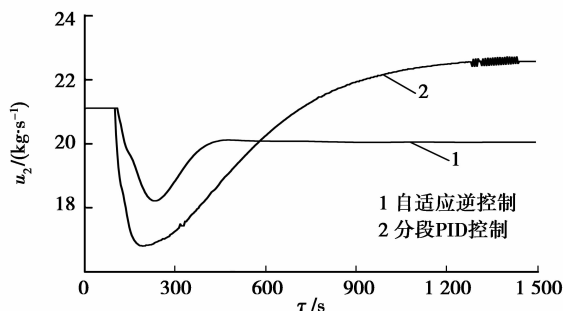


图5 一级减温喷水量变化过程

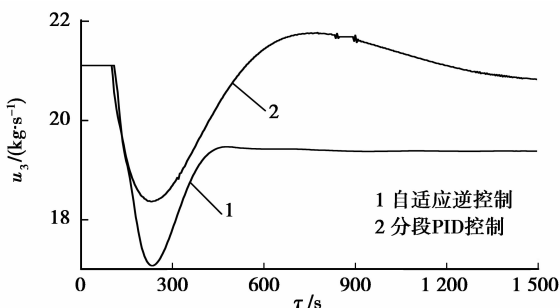


图6 二级减温喷水量变化过程

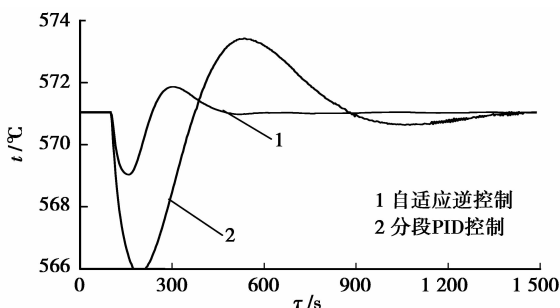


图7 锅炉出口汽温变化过程(75%负荷)

另外,比较图3和图7可以看到,当控制对象特性发生较大变化时,分段控制系统的性能明显下降,而自适应逆控制系统仍保持了较好的控制效果,较分段控制系统具有更好的适应性。

5 结论

建立了一种基于逆动力学模型的锅炉给水及过热汽温控制系统,利用LS-SVM在线辨识给水及过热汽温对象逆动力学模型,实现锅炉给水及过热汽温的自适应逆控制。

所建立的锅炉给水及过热汽温控制系统,在同时考虑锅炉出口汽温以及微过热汽温等对给水量和各级喷水量共同需要的前提下,实现了直流锅炉给水及过热汽温的综合控制。

仿真实验表明,所建立的控制系统具有较好的综合控制品质和自适应能力,并能有效地消除在汽温分段控制系统中容易出现的控制量反复振荡现象。

参考文献:

- [1] Ghaffari A, Moosavian S A A, Chaibakhsh A. Experimental fuzzy modeling and control of a once-through boiler [C] // Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, July 29-August 1, 2005, Niagara Falls, Ont., Canada. Piscataway: IEEE Press, 2005, 3: 1340-1345.
- [2] Xu C, Kephart R W, Menten C H. Model-based once-through boiler start-up water wall steam temperature control [C] // Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications, September 25-27, 2000, Anchorage, AK. Piscataway: IEEE Press, 2000:778-783.
- [3] 于达仁,徐志强.超临界机组控制技术及其发展[J].热能动力工程,2001,16(2):115-121.
Yu Daren, Xu Zhiqiang. Control technology of supercritical power generation units and its development trend [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2001, 16(2):115-121.
- [4] 王广军,吴景兴,陈红,等.直流锅炉冷态启动过程仿真分析[J].中国电机工程学报,1999,19(1):34-38.
WANG Guangjun, WU Jingxing, CHEN Hong, et al. Once-through boiler cold start process simulation analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1):34-38.
- [5] Vapnik V. The nature of statistical learning theory [M]. Berlin:Springer-Verlag, 1999.
- [6] Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers [J]. Neural Processing Letters, 1999, 9(3):293-300.
- [7] 沈曙光,王广军,陈红.最小支持向量机在系统逆动力学辨识与控制中的应用[J].中国电机工程学报,2008,

- 28(5):85-89.
SHEN Shuguang, WANG Guangjun, CHEN Hong. Application of RLS-SVM in identification and control for inverse dynamics of system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5):85-89.
- [8] 陈红, 王广军, 王志杰, 等. 基于最小二乘支持向量机的模糊辨识及其在热工对象逆系统建模中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010(29):103-106.
CHEN Hong, WANG Guangjun, WANG Zhijie, et al. Fuzzy identification based on least squares support vector machine and its application on modeling the inverse system of thermal object[J]. Proceedings of the CSEE, 2010(29):103-106.
- [9] 李益国, 沈炯. 基于 v -支持向量回归的 T-S 模糊模型辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18):148-153.
LI Yiguo, SHEN Jiong. T-S fuzzy modeling based on v -support vector regression machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18):148-153.
- [10] Suykens J A K, Lukas L, Vandewalle J. Sparse approximation using least squares support vector machines [C] // Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2000), May 28-31, 2000, Geneva, Switzerland. Piscataway: IEEE Press, 2000, 2:757-760.
- [11] 王广军, 李勇, 吴景兴. 锅炉受热面热力过程的通用数学模型[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4):254-257.
WANG Guangjun, LI Yong, WU Jingxing. General model of thermal process of the boiler heated surface [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4):254-257.
- [12] 王广军, 章臣樾. 直流锅炉蒸发受热面运行分析及实时仿真通用数学模型[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(1):61-66.
WANG Guangjun, ZHANG Chenyue. A universal mathematical model for both performance analysis and real-time simulation of evaporation zone in once-through boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(1):61-66.
- [13] 沈曙光. 基于支持向量机的热工过程逆动力学建模及控制[D]. 重庆:重庆大学博士学位论文, 2009.

(编辑 陈移峰)

(上接第 11 页)

- [8] Ala G, Di P M C, Tine G, et al. Evaluation of radiated EMI in 42-V vehicle electrical systems by FDTD simulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4):1477-1484.
- [9] Ruddle A R. Electromagnetic modeling for EMC [C] // Proceedings of the 2008 IEEE 7th International Conference on Computation in Electromagnetics, April 7-10, 2008, Brighton, UK. Piscataway: IEEE Press, 2008:170-174.
- [10] Neumayer R, Stelze A, Haslinger F, et al. Continuous simulation of system-level automotive EMC problems [C] // Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 18-22, 2003, Boston, MA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2003, 1:409-413.
- [11] 贾晋. 汽车点火系统电磁干扰预测方法的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [12] Chen C C. Predicting vehicle-level EMC performance utilizing on-bench component characterization results [C] // Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 2-6, 1999, Seattle, WA, USA. Piscataway: IEEE Press, 1999, 2:765-769.
- [13] Smith W T, Frazier R K. Prediction of anechoic chamber radiated emission measurements through use of empirically-derived transfer function and laboratory common-mode current measurement [C] // Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 24-28, 1998, Denver, CO, USA. Piscataway: IEEE Press, 1998:387-392.
- [14] 路宏敏. 工程电磁兼容[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.
- [15] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010.
- [16] 黄怡然, 孙悦, 尹成群. 基于混沌理论的蓄电池内阻检测的研究[J]. 电源技术, 2009, 33(5):415-416, 425.
HUANG Yiran, SUN Yue, YIN Chengqun. Battery internal resistance measurement based on chaotic theory [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(5):415-416, 425.

(编辑 张小强)