

文章编号: 1001-0920(2010)12-1905-04

单神经自适应 PSD 预测控制在过热汽温切换系统中的应用

余雷¹, 费树岷¹, 李勋¹, 刘一福²

(1. 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 安徽省电力科学研究院热工所, 合肥 230022)

摘要: 提出一种基于单神经元自适应 PSD (proportional sum differential) 预测控制器的新型火电厂过热汽温切换控制系统. 采用单神经元自适应 PSD 控制与 Levinson 预测器相结合的控制方式以改善大滞后、多干扰系统的控制特性, 同时利用 Foxboro 公司 I/A 系列的 DCS 控制系统平台对其组态设计 (包括无扰切换、前馈补偿以及抗积分饱和和等), 以实现手动切换和各控制器之间的合理切换. 实验室的多次仿真研究和某火电厂的现场运行均表明该控制系统具有良好的控制品质.

关键词: 单神经元自适应 PSD 预测控制器; 过热汽温; 组态设计; 无扰切换; 前馈补偿
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Application of superheated steam temperature switching systems based on single-neuron self-adaptive PSD predictive control

YU Lei¹, FEI Shu-min¹, LI Xun¹, LIU Yi-fu²

(1. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems Engineering of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Thermal Processes, Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China. Correspondent: YU Lei, E-mail: slender2008@163.com)

Abstract: A switching control system of boiler's superheated steam temperature based on single-neuron self-adaptive proportional sum differential(PSD) predictive controller is proposed in this paper, in which a compound controller to improve the control characteristics of large-lag and multi-interferer systems is combined with single-neuron self-adaptive PSD controller and Levinson predictive controller. Configuration design including undisturbed switching, feed-forward compensation and anti-saturation of integrator is made with DCS control platform of Foxboro I/A series to realize manual/auto switch and switching between controllers. A large number of simulations in the lab and practical results in the power plant show the satisfactory control quality.

Key words: Single-neuron self-adaptive PSD predictive controller; Superheated steam temperature; Configuration design; Undisturbed switching; Feed-forward compensation

1 引言

在火电厂的运行过程中, 严格控制过热汽温在规定的范围内变化, 对于保证锅炉的安全经济运行具有重要的意义. 火电厂锅炉是一个非线性耦合、大滞后、多变量、多干扰的复杂对象, 目前国内大多数火电厂锅炉过热汽温控制系统仍采用 PID 控制器, 由此在控制品质上有许多不足之处, 如调节不及时、超调量过大等问题. 目前, 很多学者提出了许多针对锅炉过热汽温控制系统的先进控制算法策略^[1-3].

本文依据单神经元 PSD 控制成功应用于再热汽

温控制系统中的思想^[3], 采用单神经元自适应 PSD 控制^[1,3]与 Levinson 预测器^[4,5]相结合的方式, 利用单神经元的自学习、自组织能力, 根据被控对象的变化情况对控制器的权值进行在线调整. 同时利用 Levinson 预测器的预测控制机理, 在一定程度上解决了大时滞系统对控制性能的影响. 另外, 考虑控制对象的干扰性、不确定性等特点, 利用 Foxboro 公司 I/A 系列的 DCS 控制系统平台对其进行组态设计, 使得单神经元自适应 PSD 预测控制、PID 控制以及手动控制可进行无扰切换, 改善了整个过热汽温

收稿日期: 2009-10-22; 修回日期: 2009-12-08.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60835001); 国家自然科学基金项目(60804017, 60764001).

作者简介: 余雷(1983-), 男, 安徽宣城人, 博士生, 从事火电厂汽温控制、切换控制等研究; 费树岷(1961-), 男, 安徽宣城人, 教授, 博士生导师, 从事时滞系统分析与控制、非线性控制等研究.

切换控制系统的控制品质。

2 单神经元自适应 PSD 预测控制器的设计

针对火电厂锅炉过热汽温控制系统具有大迟延、时变、不确定等特点,主调节器采用了本文设计的单神经元自适应 PSD 预测控制器,其模型结构方框图如图 1 所示。

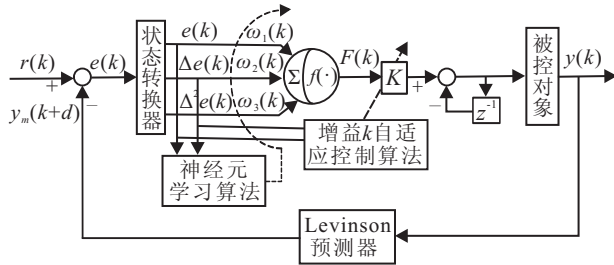


图 1 控制系统的模型结构图

从图 1 可以看出,整个控制系统主要由两部分组成:单神经元自适应 PSD 控制器和 Levinson 预测器。其设计思路是结合预测控制思想,在单神经元自适应 PSD 控制器的基础上,添加一个 Levinson 预测器以预测系统未来 d 步的输出值,采用该预测值作为该控制器的反馈量。受纯滞后的影响,当前拍的控制量要经过纯滞后 d 拍后,才会对控制对象产生作用,所以预测 d 拍后的对象输出值可用来指导当前拍控制量大小的计算,大大提高了系统的控制能力和快速响应能力。

具体的控制算法如下:Levinson 预测器是根据输出变量历史数据预测未来输出变量的方法,采用最小二乘法选择合适预测参数 a_i 来保证超前 d 步的预测值 $y_m(k+d)$ 和实际值 $y(k)$ 之间的偏差达到最小^[8]。 k 时刻预测器的输出为

$$y_m(k) = - \sum_{i=1}^n a_i y(k-i), \quad (1)$$

则 d 步超前的预测值为

$$\begin{aligned} y_m(k+d|k) &= \Psi(k)^T \theta_i = \\ & -a_1 y_m(k+d-1|k) - \dots - a_{p-1} y_m(k+1|k) - \\ & a_p y(k) - \dots - a_n y(k+d-n). \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $\theta_i^T = (a_1, \dots, a_{p-1}, a_p, \dots, a_n)$, $\Psi(k)^T = (y_m(k+d-1|k), \dots, y_m(k+1|k), y(k), \dots, y(k+d-n))$, $y_m(k+d)$ 为 k 时刻 Levinson 预测器超前 d 步的预测值。 $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 可由最小二乘法估计确定, $\hat{\theta}_i = a_i$ 。通常在离线取得系统输出的历史数据 $\{y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n)\}$ 后,采用递推最小二乘法估计出最优预测参数^[1,6]

$$\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + \Delta\theta, \quad (3)$$

其中 $\Delta\theta$ 为参数估计的修正值。

单神经元自适应控制^[7]规范化处理式如下:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k), \quad (4)$$

$$\Delta u(k) = K(k)F(k) = K(k) \sum_{i=1}^3 \omega_i^*(k)x_i(k), \quad (5)$$

$$\omega_i^*(k) = \omega_i(k) / \sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)|. \quad (6)$$

式(5)中, $x_i(k)$ 为控制器 k 时刻输入,即

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) = r(k) - y_m(k+d), \\ x_2(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1), \\ x_3(k) = \Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2). \end{cases} \quad (7)$$

其中: $e(k)$ 为偏差信号, $\Delta e(k)$ 为控制器的偏差一次微分输入, $\Delta^2 e(k)$ 为控制器的偏差二次微分输入, $\omega_i(k)$ 为控制器参数的加权系数, $r(k)$ 为 k 时刻被控量的设定值, $u(k)$ 为控制器 k 时刻输出。

单神经元自适应控制器通过对权系数 ω_i 的调整来实现自适应、自组织功能,采用的学习策略对控制器的自适应能力及稳定性能都有很大影响,权系数的调整是按有监督的 Hebb 学习规则实现的^[7,8]。通过实践表明, PSD 参数的在线学习修正主要与 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 有关。因此可将加权系数学习修正部分进行修改,改进后的学习算法为

$$\begin{cases} \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_I e(k)u(k)x_1(k), \\ \omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_P e(k)u(k)x_2(k), \\ \omega_3(k+1) = \omega_3(k) + \eta_D e(k)u(k)x_3(k), \end{cases} \quad (8)$$

其中 $x_i(k) = e(k) + \Delta e(k) = 2e(k) - e(k-1) (i = 1, 2, 3)$ 。学习速率 η_P, η_I, η_D 由仿真实验按时间乘绝对误差积分准则 (ITAE) 选定不同值为佳。

由 Marsik^[7] 等给出的增益自适应 $K(k)$ 算法的递推算式为

$$K(k) = K(k-1) + \Delta K(k), \quad (9)$$

$$\Delta K(k) = \frac{-0.1}{T_v(k-1)} [\text{Sgn}(e(k)) \cdot \text{Sgn}(\Delta e(k)) + h_{\text{ref}}], \quad (10)$$

$$T_v(k) = T_v(k-1) + \Delta T_v(k), \quad (11)$$

$$T_v(k) = L^* \cdot \text{Sgn}[|\Delta e(k)| - T_v(k-1) \cdot |\Delta^2 e(k)|], \quad (12)$$

$$T_v(k) = \frac{1}{f_v} = \frac{|e(k)|}{\Delta^2 e(k)}. \quad (13)$$

阻尼指标参考值 h_{ref} , 由大量仿真实验寻优而选定为 0.15, 在此具有最佳抗扰性能。 L^* 为一正常数, $0.05 \leq L^* \leq 0.1$; $K(k)$ 为 k 时刻控制器的总增益。分析式(9)~(13)可知, K 的初始值与系统稳定性、快速性有密切关系。仿真实验表明, 当 K 的初始值得较大时, 系统调整时间短, 但响应易振荡, 超调量变大; 当其取值较小时, 系统响应慢, 超调量减少, 但取

得过小会使调整时间变大, 稳态误差增大。

概括地说, 整个控制系统的控制思想是利用过程输出的历史数据, 采用 Levinson 预测器预测未来 d 步 ($d = \tau/T$, T 为采样周期) 的输出值, 并将该预测值作为反馈信号与设定值进行比较, 作为单神经自适应 PSD 控制的输入状态变量, 从而使被延迟了的被控量超前反映到控制器, 使控制器提前动作, 明显地改善了大纯滞后、大惯性系统的控制品质, 对系统的时变性具有自适应能力。

3 DCS 控制系统平台的组态设计

3.1 过热汽温控制系统的结构与特点

本文以某火电厂 #2 炉 600 MW 机组的燃煤锅炉为例, 介绍经改造后的锅炉汽温系统的模型结构 (如图 2)。其过热器减温水系统为二级四点减温。一级减温器分左右布置在低温过热器至分隔屏过热器之间; 二级减温器分左右布置在后屏过热器至末级过热器进口连接的导汽管上。主蒸汽温度调节除受燃烧器摆动影响外, 主要采用两级喷水减温调节。

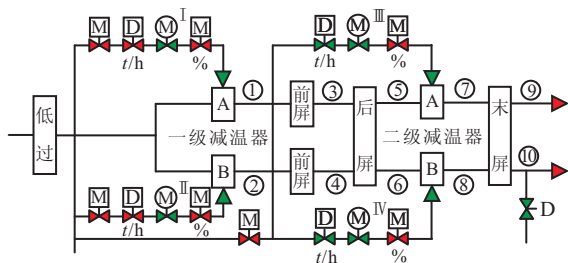


图 2 锅炉汽温系统的模型结构图

注 1 一级减温器 A 侧简称为 1A; 二级减温器 A 侧简称为 2A; 一级减温器 B 侧简称为 1B; 二级减温器 B 侧简称为 2B; 末级过热器 A 侧简称为末 A; 末级过热器 B 侧简称为末 B。

3.2 无扰切换的组态设计

在实际运行过程中, 经常有必要在各控制模式间进行切换, 同时要求此种操作不会对调节过程带来大的冲击; 在改变控制器参数时, 具有同样的要求。实现无扰切换的关键是在切换前后控制器输出值不会发生大的跳跃。该火电厂 #2 机组 DCS 系统是采用上海 Foxboro 公司 I/A 系列的组态系统。因为 I/A 系列本身就带有常规 PID 控制, 所以针对该电厂过热汽温控制系统保留该串级控制的副环 PID 控制, 对主环 PID 控制器与单神经自适应 PSD 预测控制器之间进行无扰切换。

针对该 #2 机组 4 套 (1A, 1B, 2A, 2B) 过热汽温控制系统的自动控制工程改造, 考虑了无扰切换与前馈补偿, 对其进行了 DCS 组态设计。鉴于重复性考虑, 只以 1B 侧为例给出其 DCS 组态设计的主要设计思路: 保

留了一级减温器的副环 PID 控制, 采用单神经元自适应 PSD 预测控制器控制原主环 PID 控制的 1B 侧的出口温度。1B 侧手动运行情况下, 程序跟踪现场运行的 1B 侧的输出量及控制量, 以避免切换到 1B 侧自动运行情况下产生较大干扰与误差, 目的是实现两者的无扰切换。一般情况下, 手动运行一段时间使得控制系统较为稳定时才切换到自动控制。

3.3 前馈补偿的组态设计

前馈控制^[9]是一种利用扰动信号的控制策略, 能相当经济地改善控制系统的性能。实际运行时, 影响主蒸汽温度的主要因素较多, 有蒸汽流量、主蒸汽压力、总煤量、E 层煤量、F 磨煤量、摆动火嘴角度、前屏到后屏导汽管温度等多达 10 个影响参数。1B 侧的 DCS 前馈补偿考虑的前馈量包括 1B 减温器出口温度、2B 减温器入口温度、总燃料量和 F 磨煤机煤量等。正是由于前馈补偿信号的加入, 预先测量出了影响过程的主要扰动因素; 再根据物质平衡条件, 计算出适应该扰动的调节量; 然后进行控制。因此, 该控制系统既发挥了前馈控制作用及时的优点, 又保持了反馈控制能克服多个扰动和具有对被调量实行反馈检验的长处。

3.4 抗积分饱和的组态设计

汽温低喷水减温门全部关闭时, 为防止产生积分饱和的有效方法是先切除汽温自动, 到汽温回升时再投入。但这样会增加运行人员的劳动强度, 投、切自动的时间也不好掌握。因此设计了如下逻辑: 副调节器输出指令达到上下限值时, 使主、副调节器的输入偏差自动清零。组态逻辑完成后, 又组态设计了过热汽温控制的界面显示, 既可以直观地显示实时的整套控制系统温度, 又可方便地进行手、自动控制切换。

4 仿真实验及现场调试运行曲线

火电厂热工对象的动态特征与整个机组的运行工况密切相关。2007 年 3 月, 通过该电厂的高温过热器在 37% (222 MW), 50% (300 MW), 75% (450 MW) 和 100% (600 MW) 的 4 个典型负荷下, 测量出过热汽温对喷水扰动的动态特性。经过实验室仿真软件进行大量仿真, 验证了该控制算法的可行性并优化了参数; 通过实验室自主设计的先进控制平台对该系统进行多次模拟控制, 说明本文设计的基于单神经自适应 PSD 预测控制器的新型火电厂过热汽温切换控制系统在工程上是可以应用的。

2007 年 7 月 30 日, 经过前期的大量准备 (测量动态特性、仿真、优化参数、DCS 组态等), 将本文设计的控制系统投入试验调试运行, 在该电厂 #2 发电机组 (600 MW) 稳定在 75% 负荷 (450 MW) ± 30 MW 时, 针

对2A侧和2B侧做了对比试验,图3表示的是2A侧采用DCS平台自带的PID控制系统的运行曲线,图4表示的是2B侧采用本文设计的控制系统的运行曲线.由于2A和2B的阀门结构基本类似,其静、动态的阀门特性也基本相同,因此通过对图3和图4的分析比较可看出,2A的出口温度(图3曲线4)偏差稳定在 $535\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,而2B的出口温度(图4曲线7)偏差稳定在 $535\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内.由此可见,在基本相同的阀门特性情况下,采用本文设计的新型火电厂过热汽温切换控制系统(图4)比DCS平台自带的PID控制系统(图3)更稳定,完全能够满足过热汽温的静、动态特性.

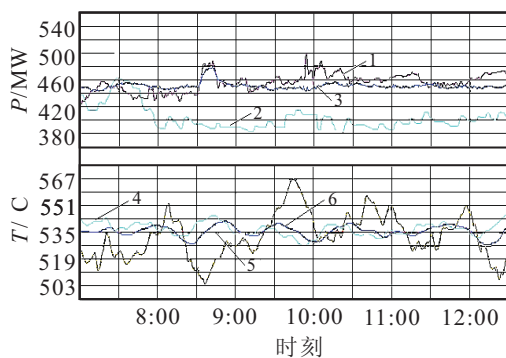


图3 2A侧DCS系统自带的PID自动控制运行曲线

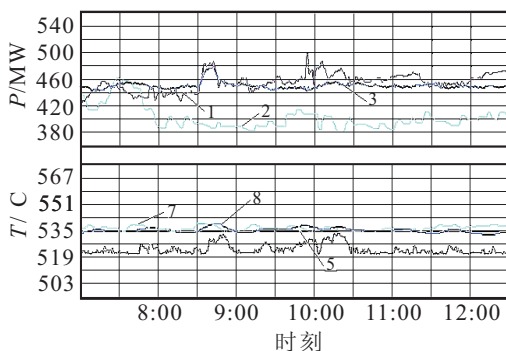


图4 2B侧采用单神经自适应PSD预测控制的运行曲线

注2 在图3和图4中,曲线1表示煤量的变化曲线;曲线2表示阀门反馈曲线;曲线3表示负荷变化曲线;曲线4表示2A的出口温度曲线;曲线5表示设定值曲线;曲线6表示末A侧出口温度曲线;曲线7表示2B的出口温度曲线;曲线8表示末B侧出口温度曲线.

通过多次长时间的运行观察,采用本文设计的基于单神经自适应PSD预测控制器的过热汽温控制系统,实行手自动切换以及控制器的无扰切换,运行结果显示稳定负荷下的汽温变化范围仅为设定值的 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,变负荷下的范围仅为设定值的 $\pm 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,满足电厂技改组规定的过热汽温静态($70\sim 100\%$ 负荷时,允许偏差 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内)和动态指标($70\sim$

100% 负荷下,负荷变化率 3% 时,偏差在 $\pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内),避免了锅炉超温现象的出现.

5 结 论

本文设计了一种基于单神经元自适应PSD预测控制器的新型火电厂过热汽温切换控制系统,并在某火电厂(600 MW)得到了很好的工程应用.该套过热汽温自动切换控制系统稳定运行两年多,在稳定负荷的正常工况或是变负荷的复杂工况下,均能达到预期效果,控制质量较理想.该系统有利于提高火电厂锅炉主汽温的控制品质以及电厂运行的自动化程度,同时火电厂运行的经济性和安全性也可得到相应的提高,有相当高的推广价值和应用前景。

参考文献(References)

- [1] 秦志明, 张栾英, 谷俊杰. 基于Smith预估器的单神经元PSD自适应主汽温控制[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(3):43-48.
(Qin Z M, Zhang L Y, Gu J J. Single-neuron PSD adaptive main stream temperature control based-on Smith Predictor[J]. J of North China Electric Power University, 2004, 31(3): 43-48.)
- [2] 肖本贤, 王晓伟, 朱志国. 基于改进PSO算法的过热汽温神经网络预测控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3):569-574.
(Xiao B X, Wang X W, Zhu Z G. Neuron network predictive control for superheated steam temperature based on modified particle swarm optimization[J]. Control Theory & Application, 2008, 25(3): 569-574.)
- [3] 赵锡龄, 焦文婷. 单神经元自适应控制PSD在再热汽温控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 93-96.
(Zhao X L, Jiao Y T. Single Neuron self-adaptive PSD control and its application in reheat steam temperature control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 93-96.)
- [4] Goodwind G C, 孙贵生. 自适应滤波、预测与控制[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Goodwind G C, Sun G S. Adaptive filtering prediction and control[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [5] 徐英, 徐用懋, 等. 时变大纯滞后系统的单神经元预测控制[J]. 清华大学学报, 2002, 42(3): 383-386.
(Xu Y, Xu Y M, et al. Single-neuron predictive control for time-variable large delay systems[J]. J Tsinghua University, 2002, 42(3): 383-386.)
- [6] Marsik J. A New conception of digital adaptive PSD control [J]. Problem of Control and Information Theory, 1983, (12):267-277.