

Smith 预估补偿控制在燃煤电厂烟气脱硝控制系统的应用

杨晋萍¹, 刘静伟¹, 白建云¹, 段宝和², 杨波³

(1. 山西大学 自动化系, 太原 030013; 2. 山西平朔煤矸石发电有限责任公司, 山西 朔州 066003;
3. 山西大学 数学科学学院, 太原 030013)

摘要: 电站锅炉的烟气脱硝过程同其他电站热工过程一样存在一定延迟性和惯性; 根据目前烟气脱硝系统运行情况, 总结分析了氮氧化物 (NO_x) 排放控制过程的特点、影响因素以及控制系统; 为解决锅炉运行过程中系统呈现出的大延迟和大惯性问题对整个烟气脱硝控制品质产生的影响, 以及实现系统的稳定性和快速性, 在原有的串级回路系统中, 加入了 Smith 预估补偿控制器提前预估系统的动态特性并对其进行补偿; 根据烟气脱硝系统对象的传递函数, 设计了 Smith 预估补偿控制系统, 采用 Matlab 中的 Simulink 对控制系统的对象和改进前后的控制系统响应曲线进行仿真分析, 可以看出改进后系统动态品质变好, 系统的快速性和稳定性也明显提高。

关键词: 电站锅炉; 烟气脱硝; 预估补偿器; 仿真分析

Application of Smith Predictor Control in Coal-fired Power Plant Flue Gas Denitrification Control System

Yang Jinping¹, Liu Jingwei¹, Bai Jianyun¹, Duan Baohe², Yang Bo³

(1. Department of Automation, Shanxi University, Taiyuan 030013, China;
2. Shanxi Pingshuo Gangue Power Generation Company Limited, Shuozhou 066003, China;
3. School of Mathematical Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: Power plant boiler flue gas denitrification process exist certain delay and inertia like other power plant thermal process. Based on the current flue gas denitrification system operation, analyzed the nitrogen oxide (NO_x) emissions control process characteristics, influencing factors and control system. In order to solve the certain delay and inertia problem for the entire flue gas denitrification control affect the quality of produce during boiler operation, and the realization of the system stability and fast, added ahead of Smith Predictor Controller estimate the dynamic characteristics of the system and its compensation in the original cascade loop system. According to the transfer function of flue gas denitrification system objects, design of Smith Predictor Control System, analysis the control system objects and the response before and after improved control system by Simulink of Matlab, as can be seen dynamic quality better of the improved system, speed and stability of the system has improved markedly.

Keywords: power plant boiler; flue gas denitrification; predictor compensation; simulation

0 引言

2012年后雾霾频发, 燃煤包括燃煤电站被认为是雾霾产生的重要来源。近几年, 我国的“节能减排”战略日益深入, 电站锅炉的氮氧化物的排放标准也日趋严格。2015年两会后, 部分省市出台政策, 加快推进燃煤发电机组超低排放改造工作。

在热工过程中, 不少的过程特性(对象特性)除了具有容积延迟外, 往往不同程度地存在纯延迟^[2]。一般过程扰动通道纯延迟对系统的控制质量没有影响, 只是使系统响应曲线推迟了一个延迟 τ 。但是当过程控制通道或者测量环节存在纯延迟时, 会降低系统的稳定性; 另外纯延迟会导致增大被控制量的

最大偏差增大, 系统的动态质量下降。因此本文在原有烟气脱硝控制系统上加入 Smith 预估控制器^[1]来减小系统产生的超调和加快调节过程, 对烟气脱硝控制系统进行优化。

1 脱硝控制系统

燃煤电站的烟气脱硝^[5]过程和其他热工过程一样存在大延迟和大惯性。烟气脱硝控制系统中被调量是烟道出口 NO_x 浓度, 而控制量是氨水流量调节阀, 当改变氨水流量调节阀后, 对烟道出口 NO_x 浓度的影响必然要延迟一段时间, 包括还原反应时间和烟气在烟道中停留时间^[3]等等。在整个的过程中, 由于纯延迟的存在, 使得被调量不能快速及时地反映系统所承受的扰动, 即使测量信号到达调节器, 调节机构接收信号后立即动作, 也需要经过纯延迟时间 τ 以后, 才能对被调量产生影响, 使之受到控制。烟气脱硝控制系统一般是带有前馈的串级反馈控制。系统运行时, 烟气中 NO_x 浓度 PID 控制作为主回路, 氨水的 PID 控制器为副回路。当出口 NO_x 浓度与设定的浓度值比较出现偏差时, NO_x 浓度调节器(主调)根据偏差

收稿日期: 2015-08-19; 修回日期: 2015-11-03。

基金项目: 山西省科技攻关项目(20140313002-1); 山西省煤基重点科技攻关项目(MD2014-03-06-3)。

作者简介: 杨晋萍(1965-), 女, 山西太原人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事大型发电机组智能优化控制方向的研究。

调节喷氨流量信号，氨水流量由喷氨流量信号调节氨气流量调节阀，改变喷氨流量使反应器出口 NO_x 浓度等于给定值，控制系统结构图如图 1 所示。

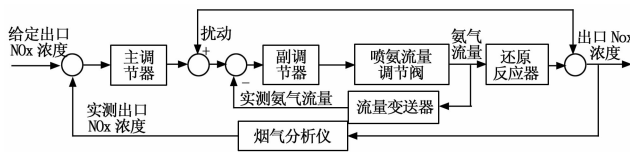


图 1 烟气脱硝控制系统结构框图

2 Smith 预估补偿控制在烟气脱硝系统上的应用设计

由于热工控制系统普遍存在大延迟、大滞后的特性，因此在烟气脱硝控制系统中加入 Smith 预估补偿控制器，可以预估系统的动态特性，提前对之进行补偿，可以将延迟的超调量提前反映到控制器上。控制器提前动作，可以提前修正控制器的参数，将系统的超调量提前反映到控制器上，可以加快系统的控制过程同时降低系统的超调量。

2.1 Smith 预估补偿原理

一般烟气脱硝系统采用的是比较简单的单回路控制系统，如图 2 所示。在回路系统中控制器的传递函数是 $G_c(S)$ ，控制对象的传递函数是 $W(S) = K_g(S)e^{-\tau D^s}$ ，其中无纯延迟环节时对象的传递函数是 $K_g(S)$ 。假设 $W_1(S) = K_1 g_1(S)$ 是 Smith 预估补偿器的传递函数。

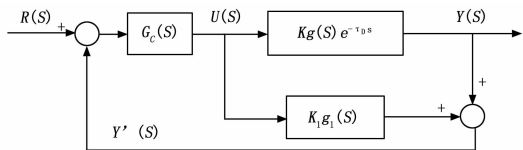


图 2 Smith 预估补偿控制原理图

未加 Smith 预估补偿器时，简单回路系统的控制器输出 $U(S)$ 和被调量 $Y(S)$ 的传递函数是：

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = K_g(S)e^{-\tau D^s} \quad (1)$$

通过式 (1) 可以看出，被控量在控制作用下要经过延迟时间 τ_D 才能反馈到系统的控制器上，会造成系统的延迟。

增加 Smith 预估补偿器后，控制器的输出 $U(S)$ 与反馈回路的信号 $Y'(S)$ 的传递函数是并联通道的和，通过简化之后得

$$\frac{Y'(S)}{U(S)} = K_g(S)e^{-\tau D^s} + K_1 g_1(S) \quad (2)$$

若消去控制器采集到信号的 $Y'(S)$ 的延迟 τ_D ，则需将上式转换为：

$$\frac{Y'(S)}{U(S)} = K_g(S)e^{-\tau D^s} + K_1 g_1(S) = K_g(S) \quad (3)$$

因此可以通过式 (2) 和式 (3) 可以得出 Smith 预估补偿器的传递函数为：

$$K_1 g_1(S) = K_g(S)(1 - e^{-\tau D^s}) \quad (4)$$

2.2 基于 Smith 预估补偿的控制系统

分析 Smith 预估补偿的原理可以得到 Smith 预估补偿控制系统就是：在原来回路系统的基础上添加与对象除去纯延迟环

节后相同的传递函数为 $K_g(S)$ 的环节和一个延迟时间为 τ_D 的纯延迟环节组成的回路系统。Smith 预估补偿^[7]主要是在增加系统回路的基础上消去延迟环节对整个控制过程的影响，将控制系统的品质调节到与无延迟环节时一样。图 3 所示为 Smith 预估补偿控制系统图。

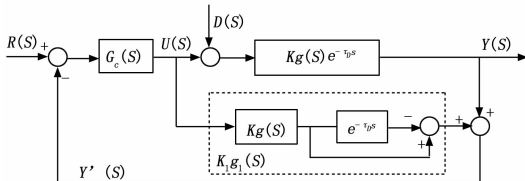


图 3 Smith 预估补偿控制系统图

由上面的系统图可以推导出整个系统的闭环传递函数为：

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{KG_c(s)g(s)e^{-\tau D^s}}{1 + KG_c(s)g(s)(1 - e^{-\tau D^s})} = \frac{KG_c(s)g(s)e^{-\tau D^s}}{1 + KG_c(s)g(s)} \quad (5)$$

加入 Smith 预估补偿环节后系统闭环传递函数的特征方程中不再包含 $e^{-\tau D^s}$ 项，滞后环节对整个系统控制品质的影响可以消除。

3 利用 Smith 预估补偿控制对烟气脱硝控制系统进行改进并对其仿真

对烟气脱硝系统进行试验，做控制对象的阶跃响应曲线，可以得到氨气流量响应曲线和出口 NO_x 浓度对氨气流量的响应曲线^[4]。喷氨量控制的传递函数表达式如下所示：

氨气流量响应函数：

$$W_1(s) = \frac{4.1125}{16s^2 + 2s + 1} \quad (6)$$

出口 NO_x 浓度响应函数：

$$W_2(s) = \frac{-1.73e^{-13s}}{10230s^2 + 196s + 1} \quad (7)$$

3.1 串级反馈控制响应

利用 Matlab 中的 Simulink 对控制对象进行仿真分析。如图 4 所示氨气流量响应曲线和出口 NO_x 浓度对氨气流量的响应曲线。可以看出氨气流量在阶跃输入下能够快速响应，出口 NO_x 浓度在阶跃输入下存在 13 s 的延迟，同时达到稳定的时间比较长，说明烟气脱硝系统是大惯性和大延迟的控制对象。

利用 Matlab 中 Simulink 建立如图 5 所示的烟气脱硝系统的喷氨量控制的模型。通过整定 PID 控制器参数，对烟气脱硝的喷氨量控制系统分别进行无扰动和在 1 000 s 时加入单位阶跃扰动的仿真试验。

通过仿真试验可以得到如图 6 所示的曲线图。实线是没有扰动的仿真曲线，虚线是在 1 000 s 时加入阶跃扰动的曲线。通过两组曲线可以看出，没有扰动时，系统能够快速反应但是存在一定的超调量。增加扰动后，烟气中 NO_x 浓度迅速变化，超调量变大同时调节过程加长。这是因为烟气脱硝系统具有大惯性和大延迟性，调节时间比较长，难以在变工况或其他因素影响下准确快速地调节喷氨量。

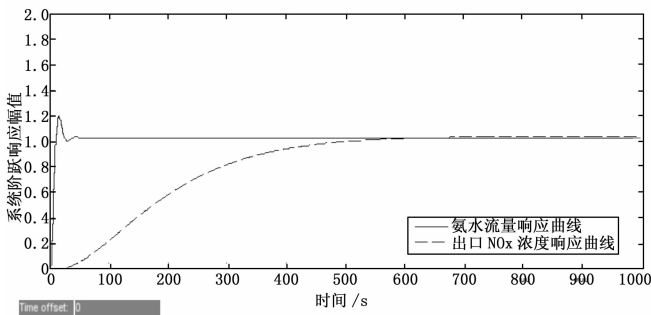


图 4 喷氨量控制响应曲线

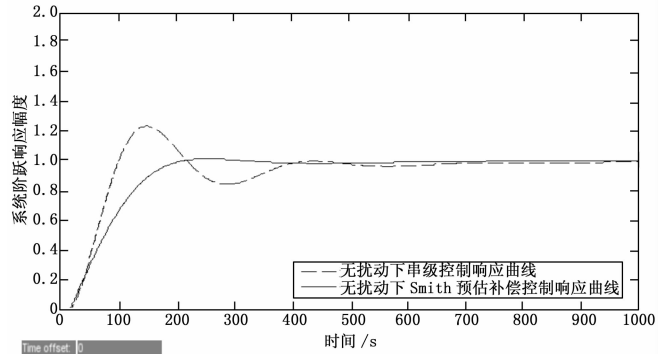


图 8 两种控制系统比较

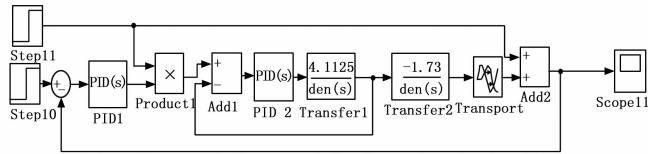


图 5 喷氨量控制的扰动仿真模型

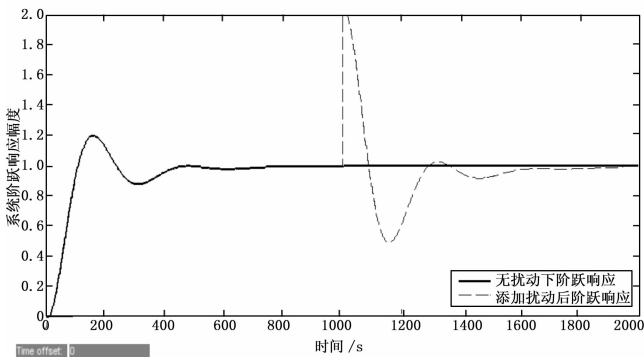


图 6 串级控制响应曲线

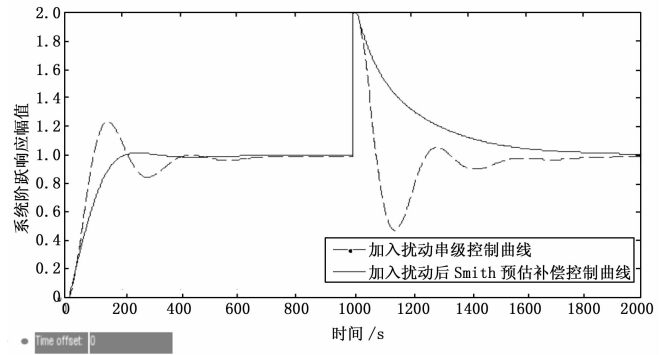


图 9 扰动下系统响应曲线图

3.2 Smith 预估补偿控制扰动实验

利用 Smith 预估补偿控制^[8]对原有的串级控制系统进行改进, 在原来串级控制的基础上加入 Smith 预估补偿控制器。加入 Smith 预估补偿控制的控制方针模型如图 7 所示, 在 Simulink 对控制对象进行仿真分析, 可以得到如图 8 所示在阶跃输入下的仿真曲线和如图 9 所示在原有控制系统加入单位扰动下的仿真曲线。

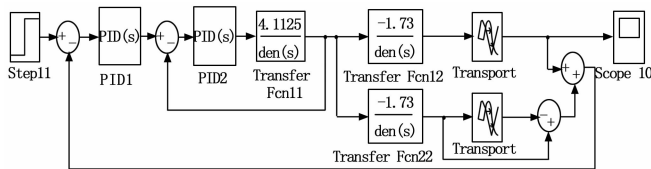


图 7 Smith 预估补偿控制仿真模型

通过图 8 和图 9 的仿真曲线可以看出, 与常规的串级控制系统相比, 加入 Smith 预估补偿控制后系统控制品质变好。未加扰动时, 改进后的控制系统的稳定时间也比原来减少。加入扰动后系统能够快速的进行反应, 在稳定过程中改进后的系统动态品质明显优于原来简单的控制系统。

4 结论

- 1) 在超低排放政策的推动下, 采用烟气脱硝来降低 NO_x 的排放已经成为我国燃煤电站的发展趋势。在控制 NO_x 排放的过程中, 控制策略的改进显得尤为重要^[6]。
- 2) 通过对烟气脱硝串级控制系统加入 Smith 预估补偿控制后进行仿真试验, 改进后的系统改善了系统的动态过程, 在控制过程取得满意的控制品质。
- 3) 随着工业自动化程度的提高, 计算机控制在工业过程中越来越起着举足轻重的作用。

参考文献:

[1] 黄德先, 王京春, 金以慧, 等. 过程控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

[2] 边立秀, 周俊霞, 赵劲松, 等. 热工控制系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[3] 段传和. 选择性非催化还原法 (SNCR) 烟气脱硝 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[4] 李峰, 王立, 高富春. SCR 烟气脱硝自动控制系统及其在国华三河电厂的应用 [J]. 热力发电, 2009 (5): 91-93.

[5] 李竞岚, 杨海瑞, 李穹, 等. 循环流化床锅炉烟气脱硝系统优化模拟 [J]. 中国电力, 2013, 46 (9): 1-5.

[6] 李穹, 吴玉新, 等. SNCR 脱硝特性的模拟及优化 [J]. 化工学报, 2013 (64): 1789-1796.

[7] 张彦军. 基于模型预测的 Smith 预估补偿控制系统 [J]. 测控技术, 2002, 21 (11).

[8] 曹顺安, 谢学军, 刘光临. 基于 Smith 预估器的 PID 自适应控制及其应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31 (1): 28-31.