

基于前馈补偿的火电厂脱硝控制系统研究

张 朝

(煤科院节能技术有限公司,北京 100013)

摘要:SCR系统具有大延迟、大惯性特性,在磨煤机启/停过程中,传统PID控制方法难以实现喷氨量的准确控制。针对这一问题,在串级控制方法的基础上,通过分析运行数据,选取磨煤机启/停信号构建喷氨量前馈补偿器,提出了SCR系统喷氨量优化控制策略,并通过定值扰动试验、滑压变负荷试验以及磨煤机变工况试验验证了控制系统效果。结果表明,喷氨量优化控制策略解决了磨煤机启/停过程中SCR出口 NO_x 浓度超标问题,有效提高了SCR系统控制品质,实现了喷氨量的及时、准确控制。优化控制策略具有较好的控制品质,在保证烟气达标排放的同时避免了过量喷氨,SCR系统的动态、静态调节品质全部满足国家相关标准。

关键词:烟气脱硝;前馈补偿;串级控制;喷氨量控制

中图分类号:TK39

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)06-0117-05

Research on control system of SCR in thermal power plant based on feedforward compensation

ZHANG Chao

(China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China)

Abstract: SCR system has the features of large delays and inertia which makes it difficult to realize the accurate control of ammonia injection based on traditional PID method during the process of start and stop of coal mill. In view of this problem, start and stop signal was selected by analyzing of operation data to build feedforward compensator for ammonia injection and SCR ammonia injection optimal control strategy was proposed based on cascade control method. The effect of the control strategy was confirmed through constant value disturbance test, variable load test and coal mill load test. The results show that ammonia injection optimal control strategy solves the problem of NO_x concentration exceeded discharge standard during the process of start and stop of coal mill, control performance of SCR system is improved and the timely and accurate control of the amount of injecting ammonia is achieved. Optimization control strategy has good performance on the efficiency of denitration and avoiding excessive injection of ammonia. Both of the dynamic and static regulating quality of SCR system could meet the relevant national standards.

Key words: flue gas denitration; feedforward compensation; cascade control; ammonia injection control

0 引 言

火电厂燃煤产生的 NO_x 是大气污染物的重要来源之一^[1]。随着火电厂超低排放标准的出台,为了降低 NO_x 排放,选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)烟气脱硝系统得到了广泛应

用^[2]。随着新能源快速发展,火电机组深度调峰能力不断提高,负荷快速变化过程中,磨煤机会执行启/停动作,造成烟气中 NO_x 浓度大幅变化,烟气超标排放。为确保火电机组全工况下烟气达标排放,SCR系统喷氨量控制得到广泛关注。罗子湛等^[3]通过分析脱硝反应过程,利用固定氨氮摩尔比方法对喷氨量进

收稿日期:2018-06-20;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18062002

基金项目:煤炭科学技术研究院有限公司技术创新资助项目(2018CX02);中国煤炭科工集团有限公司重点资助项目(2018-TD-ZD001);中国煤炭科工集团有限公司面上资助项目(2018-TD-MS007)

作者简介:张朝(1972—),男,河北晋州人,高级工程师,从事煤粉工业锅炉技术研发工作。E-mail:1584518230@qq.com

引用格式:张朝.基于前馈补偿的火电厂脱硝控制系统研究[J].洁净煤技术,2018,24(6):117-121.

ZHANG Chao. Research on control system of SCR in thermal power plant based on feedforward compensation[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 117-121.



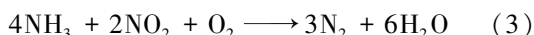
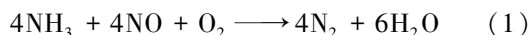
移动阅读

行控制。武宝会等^[4]等采用固定出口 NO_x 浓度方法,通过不断调整氨氮摩尔比来控制喷氨量,保证 SCR 出口 NO_x 浓度能跟踪设定值。李刚等^[5]分析了 SCR 系统喷氨控制过程中大延迟的产生原因,结合 Smith 预估器,提出了模糊自适应 Smith 串级控制策略,实现了脱硝系统快速稳定调节。

喷氨量是影响脱硝效率的重要因素,过量喷氨会导致氨逃逸超标,造成空气预热器的堵塞及下游管道的腐蚀,对机组安全运行造成不利影响;喷氨量不足会导致 SCR 出口烟气超标排放,造成环境污染并为电厂带来经济损失。目前,火电厂通常采用单回路控制策略进行喷氨量控制^[3-4]。但由于氨制备过程、烟气 NO_x 浓度取样分析过程以及 SCR 反应过程存在延迟,SCR 系统是具有大延迟和大惯性特性的被控对象,传统的单回路控制系统难以取得良好的控制效果,无法实现喷氨量的准确控制。串级 PID 控制系统能迅速克服内部扰动,及时适应机组的负荷变化,广泛应用于具有大延迟特性的被控对象^[6-9]。前馈控制可将被测量超前反映到调节器,从而克服大延迟环节的影响,改善控制品质^[10-13]。针对 SCR 系统的大延迟、大惯性特性以及磨煤机启/停对 SCR 系统的影响,本文在串级控制方法的基础上结合前馈控制策略,利用磨煤机的启/停信号构建主调节器前馈信号,利用总烟气量和 SCR 入口 NO_x 浓度构建副调节器前馈信号,提出了 SCR 系统喷氨量优化控制策略。将该策略应用于火电厂 SCR 系统并进行现场试验。

1 火电厂 SCR 系统

某电厂 330 MW 机组 SCR 烟气脱硝系统示意如图 1 所示。SCR 系统布置在锅炉省煤器与空气预热器之间,以 $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 为催化剂。氨气与稀释空气混合后经喷嘴喷入烟道中,再通过导流装置与省煤器出口的烟气混合后进入反应器。混合气体在 $300 \sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下发生选择性催化还原反应,将 NO_x 转化为无害的氮气与水蒸气,从而实现烟气脱硝^[14]。脱硝过程中的主要化学反应为



除主反应外,SCR 脱硝过程中还发生副反应:

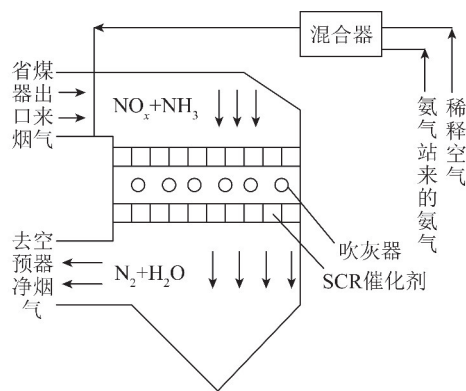
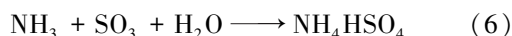


图 1 SCR 脱硝系统示意

Fig. 1 Sketch map of SCR denitration system



其中, NH_4HSO_4 是一种黏性很强的物质,会吸附在催化剂表面造成催化剂失活,还会造成下游空预器堵塞,对机组的安全稳定运行造成不利影响。因此,有必要对 SCR 系统进行优化控制,减少副反应的发生,提高机组运行的经济性和安全性。本文将前馈控制策略与串级控制方法相结合,利用磨煤机运行信息构建前馈控制信号,针对磨煤机启/停对 SCR 系统的影响,提出了喷氨量优化控制策略。

2 磨煤机启/停对 SCR 系统的影响

燃煤过程中生成的 NO_x 主要有 3 类,分别为燃料型 NO_x 、热力型 NO_x 和快速型 NO_x 。其生成机理不同但存在一定联系。 NO_x 生成量与炉膛温度关系如图 2 所示(曲线 1、2 之间为燃料型 NO_x 变化范围,曲线 3、4 之间为热力型 NO_x 变化范围,曲线 5 及以下为快速性 NO_x 变化范围)。

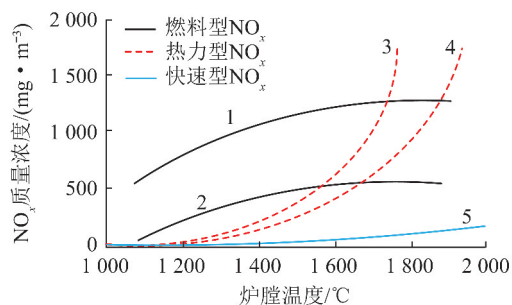


图 2 NO_x 生成量与炉膛温度关系

Fig. 2 Relationship between NO_x generation and furnace temperature

由图 2 可知,炉膛温度低于 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,燃煤生成的 NO_x 中大部分为燃料型 NO_x ,占 NO_x 总量的

60%~80%,其生成量受温度影响较小。热力型 NO_x 生成量随温度升高逐渐增多,当温度高于1400℃时,热力型 NO_x 生成量快速增长。一般煤粉炉热力型 NO_x 占比为10%~20%。快速型 NO_x 生成量较少,受温度影响也相对不显著。

磨煤机的启/停会引起燃料量以及风量的波动,造成炉膛燃烧状态变化,对炉膛出口 NO_x 浓度产生影响。磨煤机启动前需提前增加送风量,造成炉膛内煤粉处于富氧燃烧状态,在氧化性气氛条件下, NO_x 生成浓度和转化率随之提高。当磨煤机启动时,炉膛中煤粉量升高,燃料型 NO_x 增多,导致 NO_x 总量升高。磨煤机停止过程中需维持送风量不变,风量不变而燃料量减少导致过量空气系数升高,造成 NO_x 生成量增多。随着火电深度调峰能力的不断增强,磨煤机的启/停频率也随之提高。磨煤机的启/停过程会造成SCR入口 NO_x 浓度大幅波动。为保证脱硝效率的同时减少副反应发生,应对喷氨量进行精确控制,避免喷氨过量。

3 SCR系统喷氨量优化控制

3.1 常规PID控制方法

目前,常用的SCR系统喷氨量控制方法主要有2种:固定氨氮摩尔比控制方法和出口 NO_x 定值控制方法。由于烟气中 NO_x 主要存在形式是 NO ,脱硝反应主要以式(1)为主,脱除1 mol的 NO 需消耗1 mol的 NH_3 。固定氨氮摩尔比方法以此为依据,通过入口 NO_x 总量计算所需喷氨量。与固定氨氮摩尔比方法不同,出口 NO_x 定值方法通过不断调整氨氮摩尔比来改变喷氨量大小,从而保证SCR出口 NO_x 浓度稳定在一个固定值。固定氨氮摩尔比方法与出口 NO_x 定值方法的控制原理如图3、4所示。

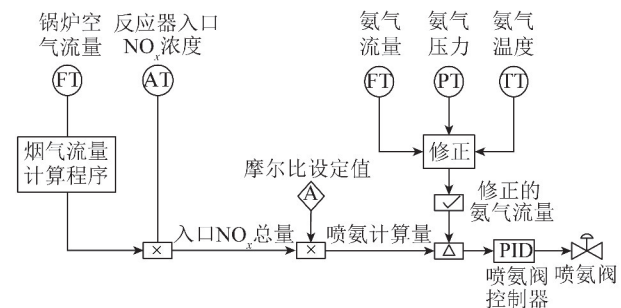


图3 固定摩尔比控制原理

Fig. 3 Control schematic of constant mole ratio

由于SCR系统的大延迟特性,常规PID控制方法喷氨量调整存在滞后,从而对脱硝效率造成不利

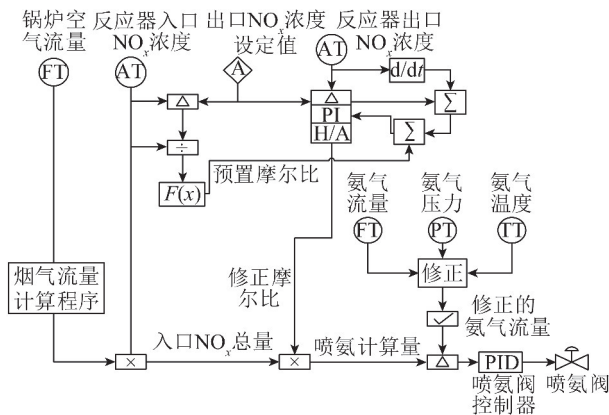


图4 出口 NO_x 定值控制原理

Fig. 4 Control schematic of constant outlet NO_x

影响。此外,磨煤机启/停也会导致SCR入口 NO_x 浓度大范围波动,增加控制难度,影响控制效果。因此实际应用中,控制效果并不理想。

3.2 喷氨量优化控制策略

被控对象存在大延迟环节时,常规PID控制方法难以取得很好的控制效果。为解决这一问题,可根据对象特性设计前馈补偿器,将被调量超前反映到调节器,从而克服大延迟环节的影响,提高控制品质,改善控制效果。

SCR系统反应过程复杂,影响脱硝效率因素众多,通过对机组运行历史曲线进行分析,发现机组在启/停磨煤机过程中,SCR出口 NO_x 浓度显著增加。针对这一问题,将不同层燃烧器对应的磨煤机的启/停作为前馈控制信号引入控制策略中,并与串级PID控制方法相结合,提出了喷氨量优化控制策略,如图5所示。图5中 X_1 、 Y_1 为针对不同层燃烧器磨煤机启/停过程分别设计的脉冲时间, X_2 、 Y_2 为与磨煤机启/停过程相对应的喷氨流量。当磨煤机发出启/停信号时,前馈补偿器通过脉冲信号作用于SCR系统,短时增加一定的喷氨流量,从而避免炉膛富氧

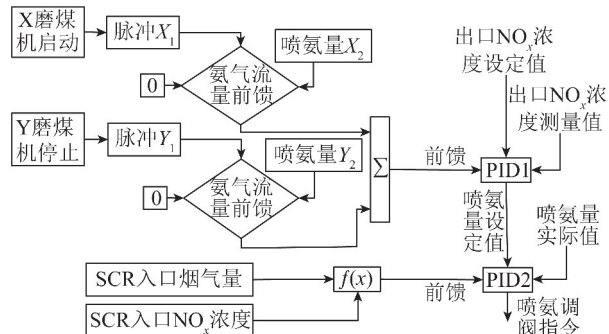


图5 喷氨量优化控制方案示意

Fig. 5 Optimal control strategy of ammonia injection

燃烧造成的 SCR 出口 NO_x 浓度上升。其中, X_1 、 X_2 、 Y_1 和 Y_2 需要根据机组实际情况分别确定, 确保适量喷氨。

4 优化控制策略应用

4.1 NO_x 设定值扰动试验

设定值扰动试验如图 6 所示。设定 SCR 系统 A 侧出口 NO_x 浓度, 从 20 mg/m^3 升至 35 mg/m^3 , 之后阶跃下降至 30 mg/m^3 。

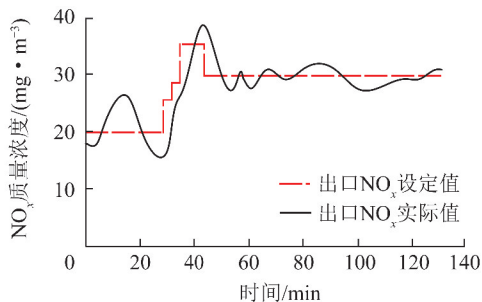


图 6 2 号机组脱硝系统 A 侧(NO_x) 设定值扰动试验曲线

Fig. 6 Experiment curves of A-side(NO_x) set value disturbance of No. 2 unit's denitration system

对 SCR 系统 B 侧出口 NO_x 设定值进行扰动试验, 将设定值先从 35 mg/m^3 降至 20 mg/m^3 , 持续 5 min 后再升至 35 mg/m^3 , 最后降至 25 mg/m^3 。SCR 系统响应效果如图 7 所示。可知, 出口 NO_x 浓度设定值发生变化时, NO_x 实际值存在一定延迟。这是由于喷氨量在调整过程中要经烟气浓度检测和氨制备等环节, 造成了一定延迟。当喷氨量调整完毕, 出口 NO_x 浓度实际值与设定值基本保持一致。

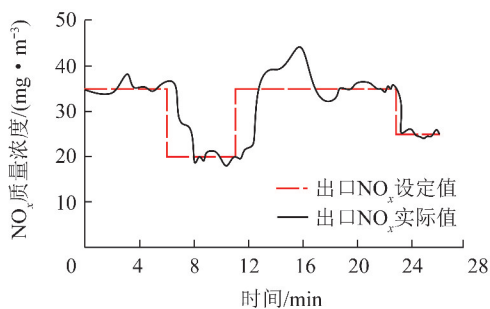


图 7 2 号机组脱硝系统 B 侧(NO_x) 设定值扰动试验曲线

Fig. 7 Experiment curves of B-side(NO_x) set value disturbance of No. 2 unit's denitration system

设定值扰动试验过程中将 SCR 出口 NO_x 设定值由 20 mg/m^3 增至 35 mg/m^3 , 选取稳态偏差和稳态时间作为评价指标, 结果见表 1。可知, 在设定值

扰动试验中, 采用喷氨优化控制策略后, SCR 出口 NO_x 浓度可快速跟踪设定值, 稳态时间较短, 稳态偏差较小, 保证烟气达标排放, 控制品质良好。

表 1 2 号机组脱硝系统 A、B 侧(NO_x) 设定值扰动试验

Table 1 A, B side(NO_x) set value disturbance experiment of No. 2 unit's denitration system

项目	SCR 出口 NO_x 设定值变化/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	稳态偏差/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	稳态时间/min
A 侧	20 ~ 35	2	9.5
B 侧	20 ~ 35	4	11.0

4.2 变工况试验

对 2 号机组进行变负荷试验, 机组负荷从 280 MW 升至 330 MW, 观察 SCR 系统出口 NO_x 浓度变化趋势, 如图 8 所示。可知, 当机组稳定运行时, SCR 出口 NO_x 浓度可控制在设定值附近。机组负荷升高时, SCR 出口 NO_x 浓度随之升高, 此时喷氨优化控制系统调整喷氨量, 出口 NO_x 浓度快速下降并达到设定值附近, 保证了烟气的达标排放。

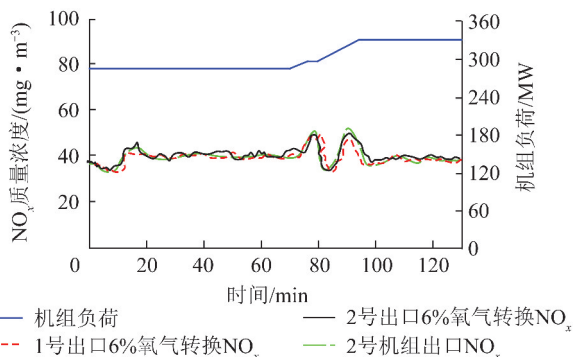


图 8 2 号机组变负荷试验工况 NO_x 控制系统随动曲线

Fig. 8 Servo curves of No. 2 unit's NO_x control system in load change test condition

改变 2 号机组 E 磨煤机运行工况, 观察磨煤机停止过程中喷氨优化控制策略的控制效果, SCR 系统出口 NO_x 浓度变化趋势如图 9 所示。可知, E 磨煤机由运行改为停止时, 炉膛富氧燃烧导致 NO_x 浓度升高, 此时及时调整喷氨量, 出口 NO_x 浓度没有出现大幅变化。此外, 由于 Y_2 数值设置合理, 喷氨量调整适度, 没有造成过量喷氨。

5 结 论

1) SCR 系统具有大延迟、大惯性特性, 随着环

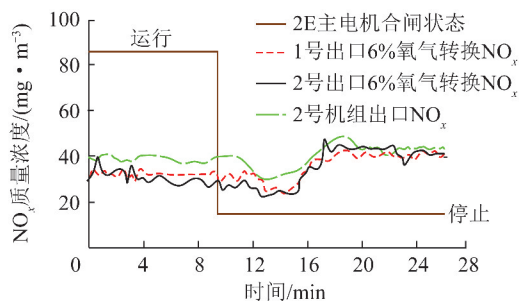


图9 2号机组启/停磨煤机工况NO_x控制系统随动曲线

Fig. 9 Servo curves of No. 2 unit's NO_x control system in start/stop coal mill condition

保要求提高,传统喷氨控制策略无法满足火电厂的运行要求。本文将串级控制与前馈控制方法相结合,利用磨煤机的启/停信号构建主调节器前馈信号,利用总烟气量和SCR入口NO_x浓度构建副调节器前馈信号,提出了SCR系统喷氨量优化控制策略。

2)将该控制策略应用于SCR系统,通过定值扰动试验、滑压变负荷试验以及磨煤机变工况试验验证了控制系统效果。结果表明,喷氨优化控制策略具有较好的控制品质,能及时、准确调整喷氨量,保证烟气达标排放的同时避免了过量喷氨,SCR系统的动态、静态调节品质全部满足国家相关标准。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国环境保护部. 全国环境统计公报(2014年)[EB/OL]. (2017-02-18)[2018-06-20]. <https://wenku.baidu.com/view/b7aceef50342a8956bec0975f46527d3240ca6df.html>.

[2] 刘建民. 火电厂氮氧化物控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2012.

[3] 罗子湛,孟立新. 燃煤电站SCR烟气脱硝喷氨自动控制方式优化[J]. 电站系统工程,2010,26(4):59-60.
LUO Zizhan, MENG Lixin. Ammonia flow automatic control mode optimization of SCR flue gas DeNO_x for coal-fired power plant[J]. Power System Engineering, 2010, 26(4): 59-60.

[4] 武宝会,崔利. 火电厂SCR烟气脱硝控制方式及其优化[J]. 热力发电,2013,42(10):116-119.
WU Baohui, CUI Li. SCR flue gas denitrification control and optimization in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(10): 116-119.

[5] 李刚,胡森,武宝会. 基于模糊自适应Smith的SCR喷氨量串级控制系统[J]. 热力发电,2014,43(8):147-150.
LI Gang, HU Sen, WU Baohui. Fuzzy self-adaptive Smith cascade control system for spraying ammonia in SCR reactors[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(8): 147-150.

[6] 冯慧山. Smith预估-串级前馈在SNCR烟气脱硝自动控制的

应用[J]. 仪器仪表用户,2016,23(5):51-53.

FENG Huishan. The application of Smith-cascade feedforward method on automatic control system of SNCR flue gas denitrication[J]. Electronic Instrumentation Customer, 2016, 23(5): 51-53.

- [7] 李昌海,冯慧山,田金海,等. 串级前馈方法在SNCR烟气脱硝系统上的应用[J]. 自动化与仪表,2016,31(2):47-49.
LI Changhai, FENG Huishan, TIAN Jinhai, et al. Application of cascade feedforward method used in the flue gas system of SNCR denitrication[J]. Automation & Instrumentation, 2016, 31(2): 47-49.
- [8] 胡文斌,韩璞,刘森. 基于内模的过热汽温串级控制系统PID参数整定[J]. 计算机仿真,2016,33(6):86-90.
HU Wenbin, HAN Pu, LIU Miao. PID parameter setting of superheated steam temperature cascade control system based on internal model principle[J]. Computer Simulation, 2016, 33(6): 86-90.
- [9] 王广军,李刚,沈曙光. 基于控制历史的过热汽温模糊串级控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):89-93.
WANG Guangjun, LI Gang, SHEN Shuguang. Fuzzy cascade control based on control's history for the superheated temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 89-93.
- [10] 马克茂,朱奕. 带有前馈补偿的模糊控制系统及其在锅炉水位控制中的应用[J]. 计算机测量与控制,2004,12(6):537-539.
MA Kemao, ZHU Yi. Fuzzy control systems with feed-forward compensation and its applications to boiler level control[J]. Computer Measurement & Control, 2004, 12(6): 537-539.
- [11] 马平,王凯宸,梁薇. 基于前馈有约束DMC的锅炉烟气脱硝控制系统设计[J]. 热力发电,2017,46(11):73-79.
MA Ping, WANG Kaichen, LIANG Wei. Design of flue gas denitrication control system based on feedforward constrained dynamic matrix control[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(11): 73-79.
- [12] 李刚,贾晓静,武宝会,等. 基于主导因素分析的SCR烟气脱硝系统喷氨量控制[J]. 热力发电,2016,45(8):99-103.
LI Gang, JIA Xiaojing, WU Baohui, et al. Spraying ammonia flow control system of SCR denitrication system based on leading factor analysis[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 99-103.
- [13] 李亚宁,王学雷,谭杰,等. 焦化换向过程烟气脱硝扰动建模与前馈控制[J]. 化工学报,2017,68(8):3168-3176.
LI Yaning, WANG Xuelei, TAN Jie, et al. Disturbance modeling and feedforward control of flue gas denitrication in coking reverse process[J]. CIESC Journal, 2017, 68(8): 3168-3176.
- [14] 周洪煜,张振华,张军,等. 超临界锅炉烟气脱硝喷氨量混结构-径向基函数神经网络最优控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(5):108-113.
ZHOU Hongyu, ZHANG Zhenhua, ZHANG Jun, et al. Mixed structure-radial basis function neural network optimal control on spraying[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(5): 108-113.