

火电机组过热汽温前馈控制及在线修正方法

吴恒刚¹, 石家魁², 徐书德³, 高展羽⁴

(1. 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121; 2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 浙江浙能中煤舟山煤电有限责任公司, 浙江 舟山 316131; 4. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 过热蒸汽温度的稳定控制是火电机组安全、经济运行的重要指标。本文分析了1 000 MW火电机组负荷变化对过热汽温的影响机理, 指出了传统过热串级控制方法的局限性, 设计了串级与精确前馈相结合的控制策略, 并给出了前馈控制器的工程整定及其在线修正方法。工程应用效果显示: 与单纯串级控制方法相比, 串级与精确前馈相结合的控制策略对过热器控制效果更具有效性。

关键词: 火电机组; 过热汽温; 精确前馈; 在线修正

中图分类号: TK26; TK323 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.07.023

[引用本文格式] 吴恒刚, 石家魁, 徐书德, 等. 火电机组过热汽温前馈控制及在线修正方法[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 177-182. WU Heng-gang, SHI Jia-kui, XU Shu-de, et al. Feed forward control and on-line correction method for superheated steam temperature of thermal power units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 177-182.

Feed Forward Control and On-line Correction Method for Superheated Steam Temperature of Thermal Power Units

WU Heng-gang¹, SHI Jia-kui², XU Shu-de³, GAO Zhan-yu⁴

(1. Zhejiang Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 311121;
2. Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001; 3. Zhejiang Zheneng China Coal Zhoushan Coal Power Co., Ltd., Zhoushan, China, Post Code: 316131;
4. Dongfang Turbine Co., Ltd. of Dongfang Electric Group, Deyang, China, Post Code: 618000)

Abstract: The stable control of the superheated steam temperature is an important indicator for the safety and economic operation of thermal power units. This paper analyzes the influence mechanism of 1 000 MW thermal power unit load change on the superheated steam temperature, points out the limitations of the traditional superheated cascade control method, designs a control strategy combining cascade and precise feed forward, and gives the engineering setting and its on-line correction method of a feed forward controller. The engineering application effect shows that compared with the pure cascade control method, the control strategy combining cascade and precise feed forward is more effective for the superheater control effect.

Key words: thermal power unit, superheated steam temperature, accurate feed forward, on-line correction

收稿日期: 2021-06-28; 修订日期: 2021-11-01

基金项目: 浙江省火力发电高效节能与污染物控制技术重点实验室开放基金(HLFD-OP-2021-01); 国家重点研发计划项目(2017YFB0902101)

Fund-supported Project: Open fund of Zhejiang Key Laboratory of Thermal Power Generation Energy Efficiency and Pollutant Control Technology of Zhejiang Province(HLFD-OP-2021-01); Key R&D Project of China(2017YFB0902101)

作者简介: 吴恒刚(1982-), 男, 浙江兰溪人, 浙江浙能技术研究院有限公司高级工程师.

引言

过热蒸汽温度的稳定控制是体现火电机组运行经济性、安全性的重要指标,对于高参数、大功率汽轮发电机组,研究其如何将过热汽温维持在额定范围内高效可靠运行具有重要意义^[1-2]。因此,许多学者对此开展了大量的研究工作。其中,针对过热汽温控制的改进,主要基于两种研究策略,一是直接将新的控制策略(长短时)神经网络、模糊控制、遗传算法、预测控制等应用于系统控制^[3-5];二是根据过热系统实际特性,提出新的控制方法,有研究者根据过热汽温系统特性,提出将状态预测与多模型相结合的控制策略,以提高主蒸汽温度调节质量,减少因主汽温度波动、滞后对机组 AGC 调节性能的影响^[6]。范昌^[7]提出一种基于 T-S 模糊模型的分布式监督预测控制策略,在各子系统原有调节层结构的基础上,增加监督层,将主汽温控制问题转化为在线优化问题。周永诚^[8]在机组原汽温控制逻辑的基础上,通过前向超前调节回路、后向控制裕度调节回路以及反向正反馈补偿回路的设计对过热段各环节的温度设定值进行动态调节,从而实现对过热汽温及其壁温的优化控制;并针对壁温超温问题设计了相应的安全保护环节。吴南江^[9]通过设计新型模糊 PID 控制器,根据偏差和偏差变化量,实时修改 PID 控制的参数,可显著改善系统的动态性能和抗干扰能力。李芹等人^[10]针对主汽温常规单变量串级控制效果差的问题,在分析相关影响因素的基础上,提出了一种主汽温多变量传递函数模型结构。马良玉等人^[11]基于历史数据针对过热蒸汽系统建立神经网络模型,在不改变机组原过热汽温控制逻辑和 PID 参数的前提下,将预测控制思想与传统的前馈-反馈补偿相结合,实现了对过热汽温设定值的优化补偿,进而显著改善了过热汽温控制效果。长短期记忆神经网络算法预测的模糊控制方法,是结合神经网络技术实现对下一时刻主蒸汽温度进行预测的新手段,将主汽温下一时刻的预测值与当前的真实值作为控制器校正环节的输入。将模糊的控制思想用于主汽温的控制研究可提高系统的鲁棒性,在此基础上自抗扰、模糊权值校正等方法可将校

正环节的输出与原模糊控制取和共同作用于喷水减温阀来控制主蒸汽温度^[12-13]。然而,上述优化策略大多基于现代控制理论,尽管在一定程度上解决了部分问题,但算法多趋于复杂,现场热控工程师学习成本高,不利于大规模推广应用。

本文通过研究火电机组负荷变化对过热器汽温的影响机理,针对性地设计了过热汽温的精确前馈控制结构,并以此为基础给出了前馈控制器的工程整定以及在线修正方法,在 1 000 MW 机组上的测试显示了其有效性。

1 过热汽温精确前馈控制理论

1 000 MW 超临界机组的过热汽温控制,分为两方面,一是通过水煤比控制中间点过热度,对过热汽温进行粗调,二是通过喷减温水对过热汽温进行细调。本文研究的是通过喷减温水对过热汽温进行细调的控制过程。

1.1 过热器的前馈控制系统

在火电机组过热器汽温串级控制的基础上,前馈控制加到减温器出口温度设定值上,如图 1 所示。其中, $R(s)$ 为过热器出口温度设定, $G_{c1}(s)$ 为主控制器的传递函数, $G_{c2}(s)$ 为副控制器的传递函数, $G_v(s)$ 为减温喷水器的传递函数, $G_j(s)$ 为减温器的传递函数, $G_g(s)$ 为过热器的传递函数, $G_c(s)$ 为前馈控制器的传递函数, $F(s)$ 为综合扰动信号的传递函数, $C(s)$ 为过热器出口实际温度。

该控制方案是在串级控制的基础上进行的,控制系统中存在 3 个控制回路,分别是串级控制的主、副控制回路和前馈控制回路。其中主、副控制回路为常规控制策略,均采用比例积分(PI)控制。主控制器的控制对象是过热器出口蒸汽温度,将副控制回路及其控制对象作为执行机构。副控制器的控制对象是减温器出口的蒸汽温度,执行机构是减温器喷水阀。

前馈控制器的综合扰动信号 $F(s)$,作用在减温器后的蒸汽温度设定值上。当综合扰动信号造成过热器汽温高于设定值时,前馈控制器将减小减温器出口温度设定值,降低减温器出口温度,以保证过热器出口蒸汽温度稳定。

1.2 前馈控制器设计

根据控制框图 1,对过热汽温控制系统施加扰动 e 为:

$$F(s) = e \quad (1)$$

$$G_T(s) = \{eG_c(s) + [R(s) - C(s)]G_{c1}(s) - T_{v1}\} \quad (2)$$

$$C(s) = G_T(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_j(s)G_g(s) + e \quad (3)$$

$$C(s) = T_{v1}G_g(s) + e \quad (4)$$

若要使前馈控制器的控制达到完全抑制综合扰动信号对过热器汽温影响,则前馈控制 $G_c(s)$ 为:

$$e \left\{ \left[G_c(s) + \frac{1}{G_g(s)} \right] G_{c2}(s)G_v(s)G_j(s)G_g(s) + 1 \right\} = 0 \quad (5)$$

$$\left[G_c(s) + \frac{1}{G_g(s)} \right] G_{c2}(s)G_v(s)G_j(s)G_g(s) + 1 = 0 \quad (6)$$

$$G_c(s) = - \frac{G_{c2}(s)G_v(s)G_j(s) + 1}{G_{c2}(s)G_v(s)G_j(s)G_g(s)} \quad (7)$$

前馈采用静态前馈,则前馈控制器的 $G_c(s)$ 的静态增益 KG_c 有:

$$KG_c = - \frac{KG_{c2}KG_vKG_j + 1}{KG_{c2}KG_vKG_jKG_g} \quad (8)$$

式中: $KG_{c2}, KG_v, KG_j, KG_g$ — $G_{c2}(s), G_v(s), G_j(s), G_g(s)$ 的静态增益。

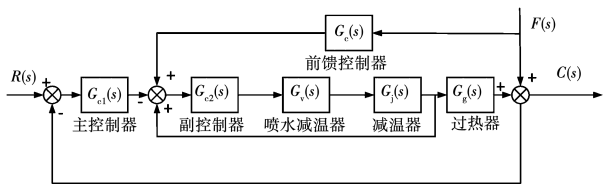


图 1 减温器出口温度设定值的前馈控制方案

Fig.1 Feed forward control scheme of outlet temperature setting value of desuperheater

2 综合扰动信号理论分析

图 2 为过热器的工质换热原理图,图中 T_{v2} 为经过过热器加热后的蒸汽温度, T_{v1} 为进入过热器前的蒸汽温度, T_{t2} 为经过过热器被冷却后的烟气温度, T_{t1} 为经过热器前的烟气温度。

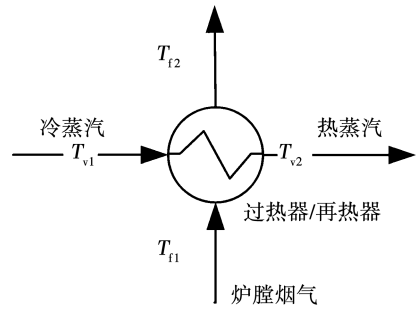


图 2 过热器工质换热示意图

Fig.2 Schematic diagram of working medium heat exchange of superheater

参与过热器换热过程的蒸汽吸热量 Q_1 , 以及炉膛烟气放热量 Q_2 为:

$$\begin{cases} Q_1 = \Delta T_v C_{pv} q_v \\ Q_2 = \Delta T_f C_{pf} q_f \end{cases} \quad (9)$$

根据换热过程能量守恒定律有 Q_1, Q_2 相等, 炉膛烟气流量 q_f 与总给煤量 M 有近似的线性关系:

$$q_f = kM \quad (10)$$

式中: Q_1 —蒸汽的吸热量, J; Q_2 —炉膛烟气的放热量, J; ΔT_v —一经过过热器前后的蒸汽温差, K, $\Delta T_v = T_{v2} - T_{v1}$; ΔT_f —一经过过热器前后的炉膛烟气温差, K, $\Delta T_f = T_{t2} - T_{t1}$; c_{pv} —过热蒸汽的比定压热容, J/(kg · K); c_{pf} —炉膛烟气的比定压热容, J/(kg · K); q_v —一经过过热器的蒸汽流量, kg/s; q_f —一经过过热器的炉膛烟气流量, kg/s; M —总给煤量, kg/s; k —炉膛烟气流量与总给煤量间的线性比例系数。

因此:

$$\Delta T_v q_v c_{pv} = \Delta T_f k M c_{pf} \quad (11)$$

火电机组在实际运行过程中, $\Delta T_f k$ 以及 c_{pv} 和 c_{pf} 变化都不大, 可以忽略, 取一常数 C 则有:

$$C \approx \frac{c_{pf}}{c_{pv}} \Delta T_f k = \frac{\Delta T_{v0} q_{v0}}{M_0} = \frac{\Delta T_v q_v}{M} \quad (12)$$

式中: ΔT_{v0} —一经过过热器前后的蒸汽温差的工况设计值, K; q_{v0} —一经过过热器的蒸汽流量工况设计值, kg/s; M_0 —总给煤量工况设计值, kg/s。

进一步有过热器前后的实际蒸汽温差 ΔT_v 与设计温差 ΔT_{v0} 的稳态差值 e :

$$e = \Delta T_v - \Delta T_{v0} = \left(\frac{M q_{v0}}{M_0 q_v} - 1 \right) \Delta T_{v0} \quad (13)$$

e 包含了动态过程中过热器汽温变化波动的主要因素:总给煤量信号 M 和过热蒸汽流量信号 q_v 。因此,将 e 作为一个反映总给煤量以及蒸汽流量扰动对过热器汽温控制系统影响的综合信号,记为 $F(s) = e$ 。

3 前馈控制器参数整定及在线修正方法

火电机组过热器汽温的前馈控制理论研究方法,用于抑制总给煤量以及蒸汽流量扰动对火电机组过热器汽温影响。然而,其综合扰动信号的设计偏向于理论化,未考虑机组运行的实际特性,同时也没有考虑煤质变化的情况,无法应对煤质变化对温度控制的影响。所以基于前馈控制结构,提出了火电机组过热器汽温精确前馈工程计算方法和针对煤质变化的在线修正方法。

相对于设计工况,由于总给煤量、蒸汽流量动态不匹配,所造成的过热器出口蒸汽温度的变化量 e 为:

$$e = \Delta T_v - \Delta T_{v0} = \left(\frac{Mq_{v0}}{Mq_v} - 1 \right) \Delta T_{v0} \quad (14)$$

式中假设 $\Delta T_v q_v / M, \Delta T_{v0} q_{v0} / M_0, (c_{pf} / c_{pv}) \Delta T_f k$ 三者均约等于一个常数,而实际运行中,这一假设是不成立的。

图3为某1000 MW 机组负荷稳定时的总煤量与蒸汽流量的稳态关系,其中 ΔT_v 基本不变,总给煤量 M 与蒸汽流量 q_v 是线性关系。但是截距为 -14.9 , 而不等于 0 , 这代表假设 $\Delta T_v q_v / M, \Delta T_{v0} q_{v0} / M_0, (c_{pf} / c_{pv}) \Delta T_f k$ 三者均约等于一个常数不成立。此时,不同的稳定负荷工况下, q_v / M 的稳态比值是变化的,机组负荷变化时,会给综合扰动信号增加了一个额外的扰动,影响温度控制。图中所示的拟合曲线为 $y = 0.10745x - 14.923$, 代表了总煤量与主蒸汽流量的线性拟合关系。

针对1000 MW 机组,考虑机组实际运行特性,假设 $\Delta T_v q_v / M, \Delta T_{v0} q_{v0} / M_0, (c_{pf} / c_{pv}) \Delta T_f k$ 相等且均约等于常数成立时,对于设计工况,由于总给煤量、蒸汽流量动态不匹配,所造成的过热器出口蒸汽温度的变化量 e 为:

$$e = \Delta T_v - \Delta T_{v0} = \left(\frac{(M + 14.9)q_{v0}}{(M + 14.9)q_v} - 1 \right) \Delta T_{v0} \quad (15)$$

因此,考虑到机组实际运行特性:机组负荷稳定时有 $M = k_1 q_v + b$, 则对于该机组,由于总给煤量、蒸汽流量动态不匹配,所造成的过热器出口蒸汽温度的变化量 e (即,综合扰动信号)为:

$$e = \Delta T_v - \Delta T_{v0} = \left(\frac{M - b}{k_1 q_v} - 1 \right) \Delta T_{v0} \quad (16)$$

其中,系数 k_1, b 可以通过调取机组历史数据分析得到:(1) 调取机组在 THA 工况(指热耗率验收工况)下的运行数据,数据选择区间为 $30\% \sim 100\%$, 间隔 10% 选择 1 组数据。数据对象为对应负荷值下的煤量 M 与蒸汽流量 q_v 。(2) 以向量蒸汽流量为自变量,以向量总煤量为因变量,进行线性拟合,得到线性拟合方程 $M = k_1 q_v + b$ 。

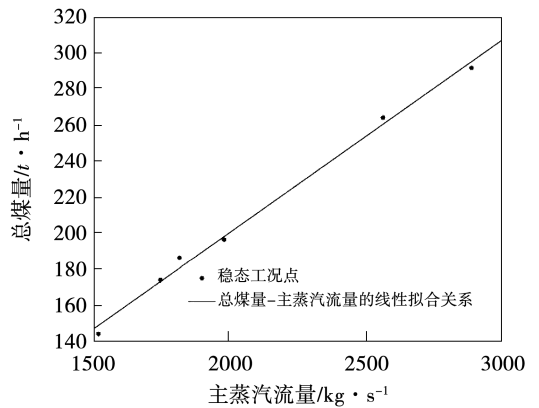


图3 1000 MW 机组总煤量与主蒸汽流量关系
Fig.3 Relationship between total coal quantity and main steam flow of 1000 MW unit

机组燃煤的煤质变化后,机组负荷状态稳定时的总煤量与蒸汽流量的稳态关系中 $M = k_1 q_v + b$ 系数 k_1, b 明显会发生变化,燃煤热值变大后, b 明显变小。由于机组运行时,总煤量与蒸汽流量稳态关系一直处于动态变化中,并不是一直在稳定状态,不能直接用于计算系数 k_1, b 。因此,使用最小二乘法在线计算得到系数 k_1, b , 来消除动态变化对总煤量与蒸汽流量稳态关系的影响。同时,能够及时计算煤质变化带来的影响,消除煤质变化对温度控制的

影响。

为了避免数据饱和现象,保证系数 k_1, b 能够及时跟踪煤质变化,借鉴渐消记忆递推最小二乘法^[13],渐消对旧数据的记忆:

$$k_1(k) = \frac{k_1(k-1) + \lambda k_1(0)}{1 + \lambda} \quad (17)$$

$$b(k) = \frac{b(k-1) + \lambda b(0)}{1 + \lambda} \quad (18)$$

式中: $k_1(k)$ —系数 k_1 的 k 时刻计算值; $k_1(k-1)$ —系数 k_1 的 $k-1$ 时刻计算值; $k_1(0)$ — k 时刻根据总煤量 M 和过热蒸汽流量 q_v 和 $k-1$ 时刻根据总煤量 M 和过热蒸汽流量 q_v 计算的系数 k_1 ; $b(k)$ —系数 b 的 k 时刻计算值; $b(k-1)$ —系数 b 的 $k-1$ 时刻计算值; $b(0)$ — k 时刻根据总煤量 M 和过热蒸汽流量 q_v 计算的系数 k_1 ; λ —遗忘因子, $0 < \lambda < 1$, λ 越接近 0,收敛过程越平稳, λ 越接近 1,跟踪过程越快。系数 k_1, b 的初始值通过调取机组历史数据分析得到。

4 汽温精确前馈控制的应用效果

在某 1 000 MW 机组上,应用火电机组过热器汽温精确前馈进行改造试验。图 4 为当机组负荷 6 min 内从 900 MW 降至 830 MW 时,串级控制下 B 侧一级过热器温度控制曲线。图 5 为单纯串级控制加精确前馈时,机组负荷在 10 min 内从 700 MW 升至 830 MW 时,B 侧一级过热器温度控制曲线。

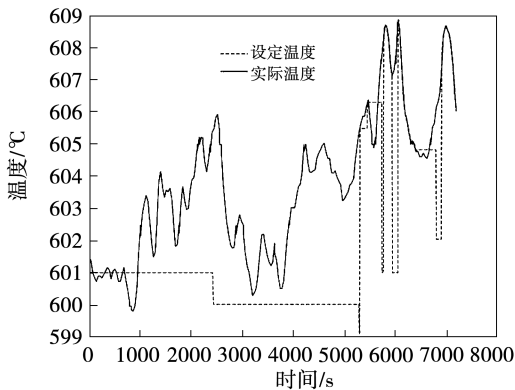


图 4 无前馈机组负荷变化时 B 侧一级过热器温度控制曲线

Fig. 4 Temperature control curve of primary superheater without feed forward at side B when unit load changes

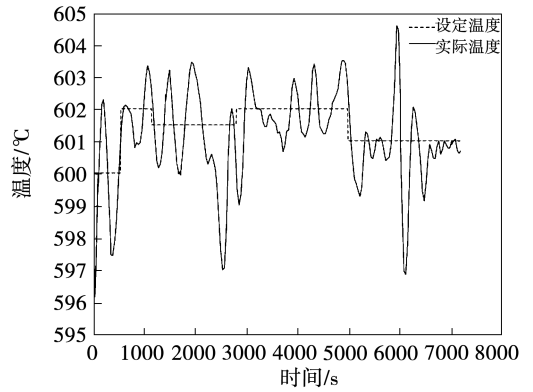


图 5 精确前馈机组负荷变化时 B 侧一级过热器温度控制曲线

Fig. 5 Temperature control curve of primary superheater with precise feed forward at side B when unit load changes

汽温精确前馈控制下与原始串级控制对比如表 1 所示。由表 1 可知,汽温精确前馈明显抑制了负荷变化对汽温控制的干扰,降低了过热器汽温的控制偏差。

表 1 汽温精确前馈的控制效果对比

Tab. 1 Comparison of control effects of steam temperature precise feed forward

控制方案	负荷变化/MW	时间/min	偏差/°C
串级控制	900→830	6	-1.2~5.87
串级+精确	700→830	10	-2.9~0.9

5 结论

(1) 过热蒸汽温度的精确前馈控制结构的设计极具针对性,给出了前馈控制器的工程整定以及在线修正方法;

(2) 前馈控制器参数整定可在一定程度上降低机组调整时对燃料量、蒸汽流量的影响,煤质变化的实时计算在一定程度上降低了煤质变化对温度控制的干扰;

(3) 通过在 1 000 MW 机组的工程应用结果,证明了该过热汽温温度精确前馈控制的有效性。

本文的构思主要基于实际应用,绕开了复杂的算法及控制结构的优化思路,所提出的方法便于实

施,可操作性强,有利于在实际机组运行中的推广。

参考文献:

- [1] 杨敏,牟文彪,陆陆,等.一种RB工况下超临界机组主蒸汽温度控制策略[J].电力科学与工程,2020,36(7):61-67.
YANG Min, MOU Wen-biao, LU Lu, et al. A main steam temperature control strategy for supercritical units under RB condition[J]. Power Science and Engineering, 2020, 36(7): 61-67.
- [2] 帅海燕.基于FLC和SPSO的电厂过热蒸汽温控系统[J].控制工程,2019,26(8):1561-1565.
SHUAI Hai-yan. Superheated steam temperature control system of power plant based on FLC and SPSO[J]. Control Engineering, 2019, 26(8): 1561-1565.
- [3] 贾永会,杜建桥,汪海洋,等.基于BP神经网络的燃煤锅炉温度分布预测[J].热能动力工程,2020,35(7):130-138.
JIA Yong-hui, DU Jian-qiao, WANG Chao-yang, et al. Temperature distribution prediction of coal-fired boiler based on BP neural network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7): 130-138.
- [4] 章家岩,高锦,冯旭刚.火力发电锅炉主汽温控制系统的动态矩阵控制策略[J].西安交通大学学报,2019,53(10):96-102.
ZHANG Jia-yan, GAO Jin, FENG Xu-gang. Dynamic matrix control strategy for main steam temperature control system of thermal power boiler[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 96-102.
- [5] 马良玉,燕梦.PID补偿神经网络逆控制在超临界机组过热汽温控制中的应用[J].热能动力工程,2020,35(1):178-184.
MA Liang-yu, YAN Meng. Application of PID compensated neural network inverse control in superheated steam temperature control of supercritical units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(1): 178-184.
- [6] 石家魁.大型汽轮发电机组AGC性能综合优化策略研究[D].吉林:东北电力大学,2020.
SHI Jia-kui. Research on AGC performance comprehensive optimization strategy of large steam turbine generator unit[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020.
- [7] 范昌.超超临界机组主汽温分布式监督预测控制[D].北京:华北电力大学,2017.
FAN Chang. Distributed supervisory predictive control of main steam temperature of ultra supercritical units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [8] 周永诚.超临界机组建模及协调控制优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
ZHOU Yong-cheng. Research on supercritical unit modeling and coordinated control optimization[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [9] 吴南江.660MW直流锅炉主蒸汽温度控制研究[J].机电信息,2020(29):142-143.
WU Nan-jiang. Research on main steam temperature control of 660 MW once through boiler[J]. Electromechanical Information, 2020(29): 142-143.
- [10] 李芹,张浩,彭道刚,等.基于改进差分算法的电站锅炉主蒸汽温度多变量建模研究[J].系统仿真学报,2017,29(8):1712-1718.
LI Qin, ZHANG Hao, PENG Dao-gang, et al. Research on multi-variable modeling of main steam temperature of utility boiler based on improved difference algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1712-1718.
- [11] 马良玉,陈婷婷,刘文杰,等.基于神经网络的超临界机组过热汽温设定值优化补偿[J].动力工程学报,2021,41(1):36-42.
MA Liang-yu, CHEN Ting-ting, LIU Wen-jie, et al. Optimal compensation of superheated steam temperature setting value of supercritical unit based on neural network[J]. Journal of Power Engineering, 2021, 41(1): 36-42.
- [12] 韩磊,王灵梅,孟子立,等.基于模糊自抗扰的锅炉主汽温控制策略研究[J].热能动力工程,2019,34(5):65-70.
HAN Lei, WANG Ling-mei, MENG Zi-li, et al. Research on boiler main steam temperature control strategy based on Fuzzy auto disturbance rejection[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(5): 65-70.
- [13] 吕正鑫.模糊控制算法研究及在火电厂主汽温控制的应用[D].北京:华北电力大学,2019.
LYU Zheng-xin. Research on fuzzy control algorithm and its application in main steam temperature control of thermal power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

(刘颖编辑)