

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2021) 09-070-06 中图分类号: TP311.52

# 火力发电厂过热汽温控制模糊控制算法研究及软件开发

Research on Fuzzy Control Algorithm and Software Development for the Superheated Steam Temperature Control of Coal-Fired Power Plant

★ 郑明欣 (大唐 (北京) 水务工程技术有限公司, 北京 100097)  
★ 徐岩泉 (东营华泰精细化工有限责任公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 随着我国电力工业的迅速发展, 越来越多的高参数大容量机组陆续投产。从发展趋势看, 600MW及以上等级的火电机组已成为大电网的主力机组, 同时大容量机组的不断增加和电网调度自动化程度的日益提高, 对火电厂机组的控制品质提出了更高的要求。主蒸汽温度是锅炉运行中的主要参数, 它的高低直接影响锅炉安全稳定运行。锅炉主汽温控制有非线性和时变性, 其大延时和大惯性的特点使其一直以来都成为火电厂自动控制的难点。本文中, 针对大容量机组中过热蒸汽大延时和大惯性的特点设计一个串级模糊控制器, 并对其进行仿真, 研究其动态特性与鲁棒性。

**关键词:** 过热器; 过热汽温; 串级PID; 串级模糊控制

**Abstract:** With China's power industry developing rapidly, more and more large-capacity high-parameter units have put into production. From the development trend, above 600 MW unit will become a main unit of the power grids in the future. With the increasing of the large-capacity unit and the increasing degree of automation of the scheduling grid, it is a higher demand to the quality control of the thermal power plant unit. Supercritical generating units is the development of large-capacity generating units in China will also become the main force units. The main steam temperature is the main parameters in the boiler operation, which affect the safe and stable operation of boiler directly. The control of main steam temperature in the boiler is nonlinear and time variability. It is very difficult to control for the large delay and the inertia of its characteristics. In this paper, in view of the large inertia and large delay of superheated steam in the large capacity unit, we design a cascade fuzzy controller and carries on the simulation to research on its dynamic characteristics and robustness.

**Key words:** Superheater unit; Superheated steam; Cascade PID; Cascade fuzzy control

## 1 引言

电力行业是国民经济发展的重要支柱, 是人类社会生产和生活必不可少的重要产业。在我国各大电力系统中, 主力机组的单机容量已由300MW过渡到600MW, 并继续向1000MW迈进。随着单机容量的增大, 蒸汽参数也向高压、超高压、亚临界、超临界、超超临界压力逐步过渡。超临界机组是我国近期发展起来的大容量机组, 并将逐渐成为国家电力行业的主力机组。

火电厂日渐朝着大机组大容量的方向发展, 这样可以提高热效率, 每千瓦的建设投资和发电成本也会降低。目前, 我国发电主要是向600MW、1000MW机组的目标迈进。由于超临界和超超临界机组具有调高煤炭利用率、降低环境污染、提高经济性的优势, 发展超临界机组和超超临界机组是必然趋势。

在火电厂中的过热器被安排在锅炉烟道里, 接收烟气的热量, 将过热器中的蒸汽变成过热蒸汽, 一般的火电厂规定过热汽温下限不低于其额定值 $10^{\circ}\text{C}$ 。大多数火电厂都要求保持过热汽温在 $530^{\circ}\text{C}\sim 545^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

常用的汽温控制方法有减温器控温、摆动燃烧器控温、烟气再循环控温和烟气挡板等, 主要手段是利用烟气侧和减温水侧进行控制。

在烟气侧, 通过旋转挡板、转动火嘴和烟气再循

环实施过热汽温的控制。虽然改变烟气温度或烟气流速也可改变过热汽温,但不能满足火电厂对过热汽温控制质量的要求,故很少被采用。

在减温水侧,通过表面式减温、喷水减温控制过热汽温。火电厂的过热汽温控制,通常是在减温水侧,通过表面式减温、喷水减温进行控制。

因减温器出口处蒸汽温度的导前作用对外扰并不明显,而被控对象过热器的特性具有不确定性、精确的数学模型难以建立等原因,故不变的控制参数是不能满足系统不同工况要求的,在负荷变化的主要因素影响下,过热汽温控制并不理想。系统存在抗干扰能力较差、鲁棒性不强和过程控制性能不理想等许多难以克服的问题,过热汽温过程控制的优化值得人们进一步地研究和探索。

目前,串级控制在火电厂中的过热汽温实时控制中占主导地位,但由于过热器具有大滞后、非线性、多变量和时变等特点,其控制效果还不能令人十分满意。

许多人从不同角度发展了很多时滞被控对象的控制方法,国内外对过热汽温控制方法进行了很多有益探索和研究。串级控制是一种常用和成熟的控制策略,但因过热器是一个具有大延迟、大惯性、强耦合、非线性等特性的复杂被控对象,故过热汽温串级控制系统可控性较差。这在一定程度上,使火电厂生产的安全性和经济性受到影响,促使人们不断进行新的探索。

针对被控对象过热器的特点,结合火电厂运行人员工作经验,利用串级控制和模糊控制技术的优势,形成过热汽温串级模糊控制系统,可以改善过热汽温串级控制系统的动态性能。

## 2 原理分析

### 2.1 过热汽温控制对象的静态特性

在10MPa以上的电站锅炉中,一般都兼用屏式和蛇形管式两种过热器,以增加吸热量。敷在炉膛内壁上的墙式过热器为辐射式过热器,较少采用。包墙式过热器用在大容量的电站锅炉中,构成炉顶和对流烟道的墙面,外面敷以绝热材料组成轻型炉墙。

在大型锅炉中的过热器管道较长,结构也很复杂。

为了进一步改善控制品质,可以采用分段汽温控制系统,即将整个过热器分为若干段,每一段设置一个减温器,分别控制各段的汽温,以维持过热汽温为给定值。对于大型锅炉,设置的减温器有2个或3~4个之多。

过热器一级减温的作用是降低进入高温过热器的蒸汽温度,保护过热器,对主汽温进行粗调。过热器二级减温的作用是对主汽温细调,使蒸汽品质合格。再热器减温水也叫事故减温水,其作用通常在烟气挡板控制无法稳定汽温情况下投用。过热器喷水减温系统如图1所示。

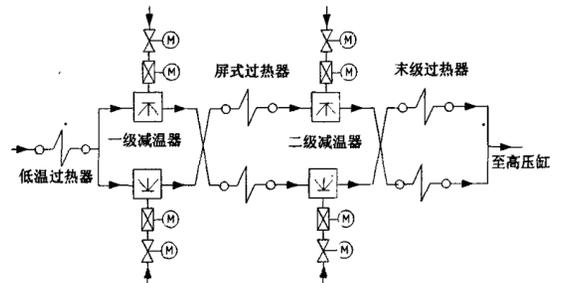


图1 过热器喷水减温控制工艺流程图

过热汽温被控对象的静态特性指过热汽温随锅炉负荷变化的静态关系。如图2所示。过热器的传热形式、结构和布置将直接影响过热器的静态特性。现代大容量锅炉的过热器系统都采取了对流式过热器、辐射式过热器和屏式（半辐射式）过热器交替串联布置的结构。这有利于减小过热器出口汽温的偏差,并改善了过热汽温被控对象的静态特性。

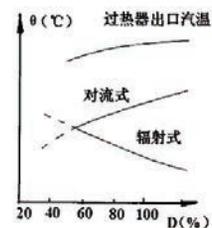


图2 过热汽温被控对象的静态特性

### 2.2 过热汽温控制对象的动态特性

#### 2.2.1 蒸汽流量扰动下过热汽温动态特性

汽机负荷变化会引起蒸汽量的变化。蒸汽量的变化将改变过热蒸汽和烟气之间的传热条件,导致汽温变化。蒸汽流量扰动下过热蒸汽温度的响应曲线如图3所示。可以看到温度响应具有自平衡特性,而且惯性和延

迟都比较小。这是因为蒸汽量变化时,沿过热器管道长度方向的各点温度几乎同时变化。

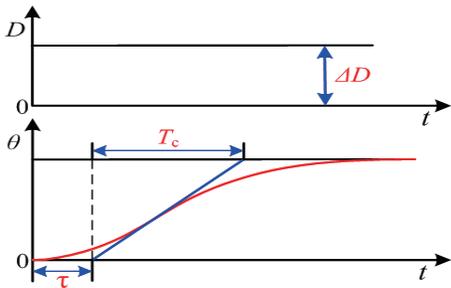


图3 蒸汽流量扰动下的汽温响应曲线

### 2.2.2 烟气侧传热量扰动下的汽温动态特性

烟气传热量扰动引起的原因很多,如给粉机给粉不均匀、煤中水分的改变、蒸发受热面结渣、过剩空气系数改变、汽包给水温度变化和燃烧火焰中心位置的改变等。尽管引起烟气传热量扰动的原因很多,但被控对象特征总的特点是有延迟、有惯性、时变、非线性和有自平衡能力。烟气流量变化对过热汽温的影响的特征曲线如图4所示。

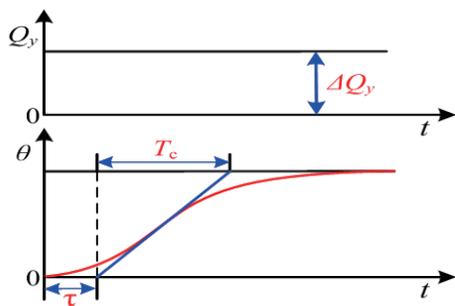


图4 烟气侧传热量扰动下汽温响应曲线

### 2.2.3 喷水量扰动下的动态特性

常用的减温方法有喷水式减温和表面式减温两种。喷水式减温的效果比表面式减温好。喷水式减温器一般装在末级过热器高温段前面。这种安装方法一方面保护了过热器高温段,另一方面又改善了控制性能。喷水式减温器与在饱和侧装设表面式减温器相比,延迟时间能减少1/4。

减温水量扰动下的被控对象特征曲线如图5所示。其特点是有延迟、有惯性和有自平衡能力。延迟时间约为30~60s,减温水量是经常使用的控制量。

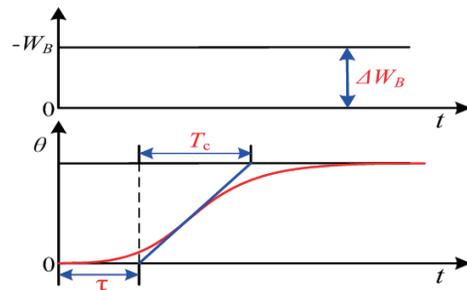


图5 喷水量扰动下的汽温响应曲线

由过热汽温的动态特性知,过热汽温被控对象在各种扰动下都有延迟、有惯性、有自平衡能力。需要指出的是,在喷水减温控制系统中,因减温水量的扰动强烈,对此段的温度要求比对高温段出口要求低,故常将减温水量作为串级控制系统的副参数。

### 2.3 过热汽温串级模糊控制策略

针对过热汽温调节系统,取实际温度与给定温度的误差E与其变化率Ec为模糊控制器的给定值,喷水减温阀的开度为被控值。设计一个双入单出的模糊控制器。

量化因子Ke、Kec和比例因子Ku的大小可根据过热汽温实际变化范围取值。语言变量E、Ec与U选取7个语言值:PB(正大)、PM(正中)、PS(正小)、0(零)、NS(负小)、NM(负中)、NB(负大)。基于操作者手动控制策略,得出一组由模糊条件语句构成的控制规则,将这些条件语句加以归纳,可建立过热汽温控制系统模糊控制规则表,如表1所示。

表1 过热汽温控制系统模糊控制规则表(U)

Ec	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
E	NB	PB	PB	PB	PM	ZR	ZR
	NM	PB	PB	PB	PM	ZR	ZR
	NS	PM	PM	PM	0	NS	NS
	0	PM	PM	PS	0	NS	NM
	PS	PS	PS	0	NM	NM	NM
	PM	0	0	NM	NB	NB	NB
	PB	0	0	NM	NB	NB	NB

根据模糊规则表,通过模糊工具箱设计模糊控制模块,隶属度函数取三角形,论域取[-6,6],得到隶属度函数如图6~图8所示。

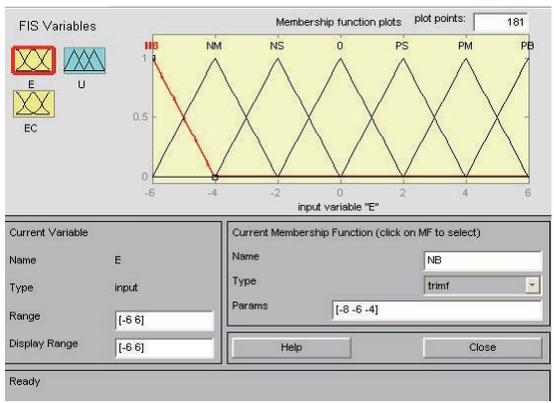


图6 误差E的隶属度函数

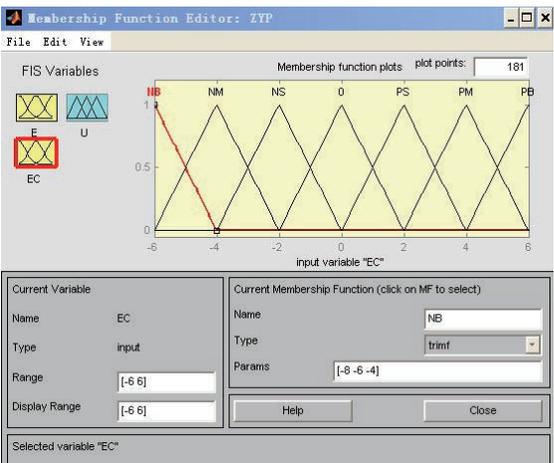


图7 误差变化率Ec的隶属度函数

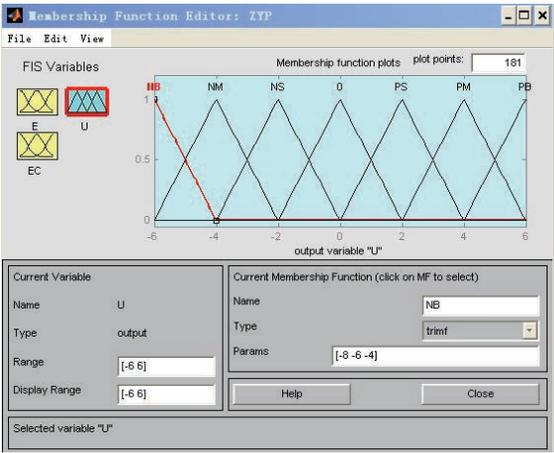


图8 输出量U的隶属度函数

打开Ruler Editor窗口按照模糊控制规则表输入控制规则，如：

- (1) If(E is NB)and (Ec is NB) then (U is PB)(1);
- (2) If(E is NB)and (Ec is NM) then (U is PB)(1);
- .....
- (49) If(E is PB)and (Ec is PB) then (U is NB)(1);

最后得到的模糊规则编辑框如图9所示。

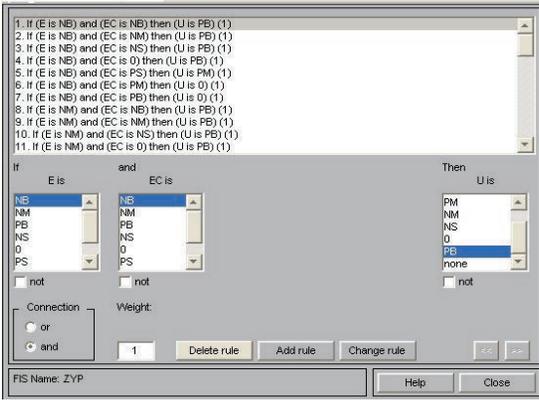


图9 模糊规则编辑框

打开曲面观测窗口（surface），可以查看U在论域上的输出曲面如图10所示。

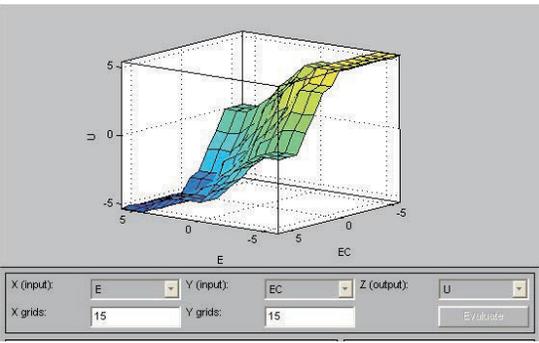


图10 U在论域上的输出曲面

这样就在MATLAB系统中设计了一个模糊控制器。在MATLAB的M文件编辑器里建立一个M文件，其内容为：matrix=readfis（‘ZYP.fis’）；这样就完成了模糊工具箱与Simulink的连接，为整个控制系统的建立打下基础。

### 3 仿真与实例验证

#### 3.1 仿真实验

根据串级控制系统，在惰性区采取PID控制方案，

在导前区加入模糊控制模块，得到一个串级模糊控制系统，如图11所示。将这两个控制系统放在同一个图像中输出，比较输出曲线。

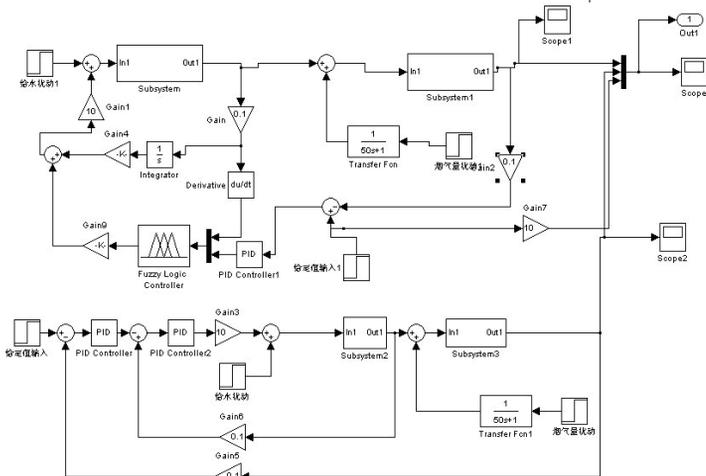


图11 串级模糊控制与串级PID控制仿真比较

(1) 先加入一个值为1的给定值，并将烟气流与蒸汽量扰动值设为0，观测得到的仿真曲线如图12所示。

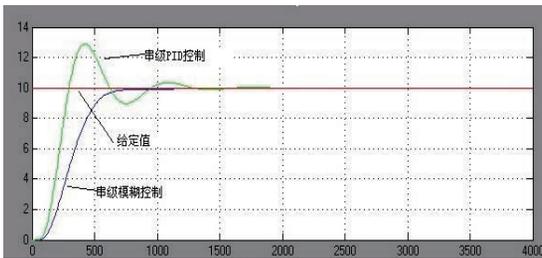


图12 无扰动时

(2) 将给定值设为0，并且在 $t=0$ 时分别加入幅值为1的烟气流扰动与幅值为1的蒸汽量扰动，得到的仿真曲线如图13所示。

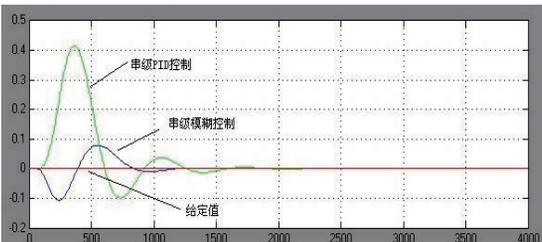


图13 同时加入蒸汽量与烟气流扰动时

由(1)、(2)知串级PID与串级模糊控制都具有好的跟踪给定值的能力，但从曲线知模糊PID控制超调量较小，而且调节时间短，调节品质较好。

(3) 取(1)中的给定值与扰动值，并在惰性区加入一个积分环节 $1/(40s+1)$ 时，得到曲线如图14所示。

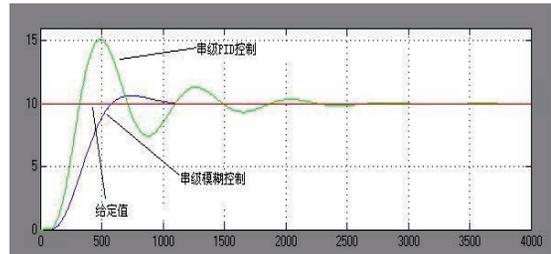


图14 惰性区控制对象数学模型改变时

与(1)比较，可以知道，当惰性区控制对象数学模型改变时，传统串级PID控制品质有很大的改变，而对串级模糊控制的影响则较小。

(4) 取(1)中的给定值与扰动值，并在导前区回路中加入一个积分环节 $1/(15s+1)$ ，得到曲线如图15所示。

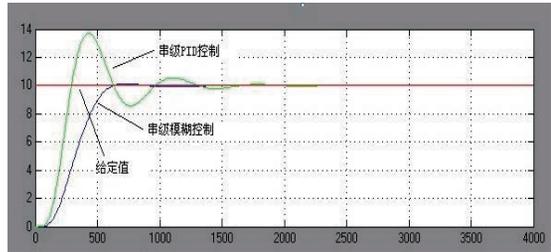


图15 导前区控制对象数学模型改变时

与(1)相比较，发现控制曲线并没有大的变化，说明对于导前区回路中，串级PID与串级模糊控制都有良好的鲁棒性。

综上所述可以得到：串级模糊控制相较于串级PID控制，具有较好的控制能力，调节曲线的震荡幅度较小，而且调节时间较短。同时串级模糊控制具有良好的鲁棒性，对于过热汽温控制回路中的高阶对象具有良好的调节作用。

### 3.2 实例验证

某燃煤机组为135MW双抽供热机组，供热能力为1.27MPa等级120t/h。锅炉为上海锅炉厂生产，型号：SG—440/13.7—M782，高温超高压中间再热自然循环锅炉，平衡通风，Π型露天布置，固态排渣煤粉炉，额定蒸发量为440t/h。采用过热汽温串级模糊控制策略前后控制效果如图16所示。

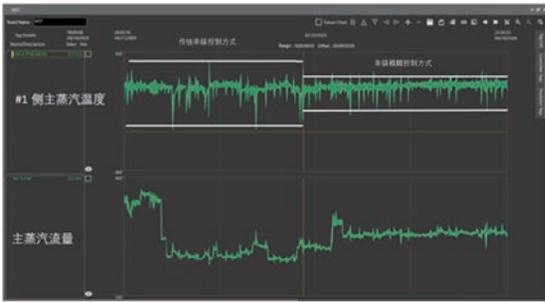


图16 过热汽温串级模糊控制策略前后控制效果对比图

串级模糊控制方式下的标准差比传统串级控制方式下降约32%以上，充分说明了串级模糊控制方式能够有效改善锅炉过热汽温的调节，提升过热汽温的稳定性，减少动态偏差。

## 4 结论

通过对本次课题的研究，可以得知串级模糊控制

针对过热汽温有一定的控制能力，其控制品质以及鲁棒性都优于串级PID控制。在后续的调试过程中发现当扰动值给值较大时，模糊控制系统的稳定性曲线变化与串级PID控制比较反应较大，说明串级PID控制的精度依然存在着一些问题，有待进一步分析研究。AP

### 作者简介：

**郑明欣**（1976-），男，山东日照人，工程师，学士，现就职于大唐（北京）水务工程技术有限公司，研究方向是工业自动化。

**徐岩泉**（1994-），男，山东东营人，工程师，学士，现就职于东营华泰精细化工有限责任公司，研究方向是工业自动化。

### 参考文献：

- [1] 罗嘉, 潘笑, 姚静. 基于MATLAB的过热汽温模糊控制系统仿真[J]. 仪器仪表学报, 2003, (8): 546 - 547.
- [2] 王丽珍. 模糊PID控制器在过热汽温控制中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2009, (2): 129 - 131.
- [3] 叶高文. 模糊控制查询表的MATLAB实现[J]. 工业控制计算机, 2010, (11): 44 - 46.
- [4] 马明前. 锅炉过热汽温的串级模糊控制系统[J]. 中国仪器仪表, 2003, (7): 21 - 22.
- [5] 周渤, 朱林林. 火电厂过热汽温系统串级控制方法的改进[J]. 仪器仪表用户, 2008, (3): 115 - 116.
- [6] 吴俊杰, 武立军, 郭嗣琮. 几种模糊控制算法的MATLAB仿真[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, (4): 278 - 280.
- [7] 陈立军, 赵丽丽, 周正兴. 基于规则自寻优的过热汽温模糊控制[J]. 化工自动化及仪表, 2010, (1): 5 - 7.
- [8] 姜超. 计算机模糊控制算法[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2003, (3): 10 - 13.
- [9] 牛培峰, 郭兴华, 王磊, 任娟. 火电厂汽包锅炉汽温控制的研究进展与发展趋势[J]. 燕山大学学报, 2008, (7): 367 - 372.
- [10] 杨涛, 高伟, 黄树红. 基于Matlab的锅炉过热汽温模糊控制系统仿真[J]. 华中科技大学学报, 2003, (4): 63 - 65.
- [11] 叶智, 刘伟, 杨新民. DMC\_PID串级控制在火电厂过热汽温控制中的应用研究[J]. 热力发电, 2005, (3): 58 - 60.
- [12] 王丹力. MATLAB控制系统设计仿真应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [13] 韦庆志, 李正明, 孙俊. 基于模糊自适应PID控制的锅炉过热蒸汽温度控制系统[J]. 机械设计与制造, 2010, (7): 173 - 175.
- [14] 张波. 串级模糊控制器在过热蒸汽温度控制中的应用[J]. 锅炉技术, 2010, (3): 5 - 9.
- [15] 张松兰. 过热蒸汽温度串级模糊控制[J]. 盐城工学院学报, 2009, (3): 43 - 45.