

# 基于 Smith 预估控制和遗传算法优化的燃油蒸汽锅炉燃烧控制

毛宇涵, 李来春, 张亮, 白钰

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘要:**为解决蒸汽锅炉燃烧控制效果不佳的问题,提出一种基于 Smith 预估控制和遗传算法优化的燃油蒸汽锅炉燃烧控制方法,使用模糊控制输出变偏置双交叉限幅燃烧控制方法中的偏置函数,对控制器采用遗传算法进行参数优化,并使用 Smith 预估控制法搭建控制回路。在仿真中以常用蒸汽压力 3.8 和 5.6 MPa 两个工况升降负荷为例,对传统的变偏置双交叉限幅燃烧控制方法和改进的燃烧控制方法进行了对比,并进行鲁棒性分析。仿真结果表明:控制系统的快速性、稳定性均有所改善,且改进后的系统具有良好的鲁棒性。

**关键词:**蒸汽锅炉; Smith 预估控制; 变偏置双交叉限幅; 遗传算法

中图分类号:TK229.7 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.03.014

[引用本文格式]毛宇涵,李来春,张亮,等.基于 Smith 预估控制和遗传算法优化的燃油蒸汽锅炉燃烧控制[J].热能动力工程,2023,38(3):105-111. MAO Yu-han, LI Lai-chun, ZHANG Liang, et al. Combustion control of oil fired steam boiler based on Smith predictive control and genetic algorithm optimization[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3):105-111.

## Combustion Control of Oil Fired Steam Boiler based on Smith Predictive Control and Genetic Algorithm Optimization

MAO Yu-han, LI Lai-chun, ZHANG Liang, BAI Yu

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

**Abstract:** In order to solve the problem of poor combustion control effect of steam boiler, a combustion control method of oil fired steam boiler based on Smith predictive control and genetic algorithm optimization was proposed. The bias function in the combustion control method featuring variable offset and dual-crisscross amplitude limit based on fuzzy control output was used to optimize the parameters of the controller using genetic algorithm, and the control loop was built using Smith predictive control method. In the simulation, the traditional combustion control method featuring variable offset and dual-crisscross amplitude limit and the improved combustion control method were compared, and the robustness analysis was carried out, taking two working conditions of steam pressures of 3.8 MPa and 5.6 MPa commonly used in engineering as an example. The simulation results show that the speediness and stability of the control system are improved, and the improved system has good robustness.

**Key words:** steam boiler, Smith predictive control method, variable offset and dual-crisscross amplitude limit, genetic algorithm

## 引 言

现代工业对燃油蒸汽锅炉的燃烧控制要求越来越高,在负荷突变的工况下,既要保证蒸汽压力调节的快速性,还要兼顾风油配比,在负荷变化的调节过程中,需要维持较好的空燃比,既不能冒白烟,也不能冒黑烟。

燃油蒸汽锅炉燃烧控制经历了单交叉限幅燃烧控制、双交叉限幅燃烧控制、变偏置双交叉限幅燃烧控制 3 个阶段<sup>[1]</sup>。单交叉限幅燃烧控制通过引入燃料与空气的正负偏置函数使燃料和空气相互限制,从而实现了空气量和燃料量的动态比值<sup>[2-3]</sup>。但这种方法只限制了升负荷时空燃比的下降幅度,而不能抑制降负荷时空燃比的上升幅度<sup>[4]</sup>。双交叉限幅燃烧控制在单交叉限幅燃烧控制的基础上进行了改进,引入了空气的正偏置函数和燃料的负偏置函数等偏置函数,在负荷变化的动态过程中,实现了对空燃比上、下限值的限定,使锅炉在负荷变化的动态过程中不会出现过氧燃烧和缺氧燃烧。这种燃烧控制方法虽然改善了燃烧的稳定性,但系统的响应速度十分缓慢。

本文提出一种基于 Smith 预估控制和遗传算法优化的燃油蒸汽锅炉燃烧控制方法,采用变偏置双交叉限幅燃烧控制作为控制策略,在对空燃比上、下限值双向限定的同时,改善了系统响应速度,同时兼具了快速性和稳定性。同时,对传统的变偏置双交叉限幅燃烧控制方法进行改进,通过模糊控制对偏置函数进行动态调节,通过遗传算法对控制器参数进行优化,并使用 Smith 预估控制法进行控制回路搭建。改进方法减小了控制系统的调节时间和超调量,提升了控制系统的稳定性。

## 1 变偏置双交叉限幅燃烧控制原理

变偏置双交叉限幅燃烧控制以蒸汽压力测量值和设定值的偏差值为依据,对不同的偏差值设置不同的偏置函数,从而达到控制燃料量和空气量的目的。变偏置双交叉限幅燃烧控制的原理如图 1 所示。

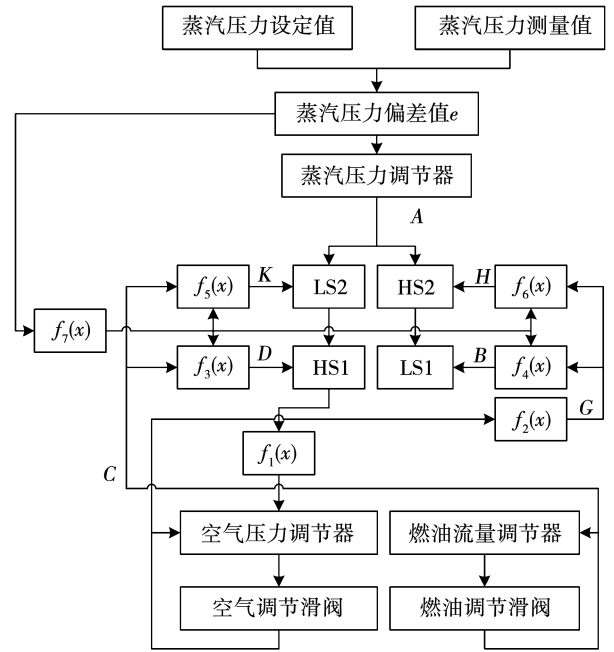


图 1 变偏置双交叉限幅燃烧原理图

Fig. 1 Diagram of variable offset and dual-cross limiting combustion control

图 1 中  $f_1(x)$  为油/风转换函数;  $f_2(x)$  为风/油转换函数;  $f_3(x)$  为空气压力负偏置函数,其输出信号为  $D$ ;  $f_4(x)$  为燃油量正偏置函数,其输出信号为  $B$ ;  $f_5(x)$  为空气压力正偏置函数,其输出信号为  $K$ ;  $f_6(x)$  为燃油量负偏置函数,其输出信号为  $H$ ;  $f_7(x)$  为变偏置函数;  $A$  为蒸汽压力调节器输出值。

由函数  $f_1(x) \sim f_7(x)$ , 高值选择器 HS1, HS2, 低值选择器 LS1, LS2 等环节共同构成了变偏置双交叉限幅燃烧控制系统,图 1 中:

$$D = C(1 - K_1 f_7(x)) \quad (1)$$

$$B = G(1 + K_2 f_7(x)) \quad (2)$$

$$K = C(1 + K_3 f_7(x)) \quad (3)$$

$$H = G(1 - K_4 f_7(x)) \quad (4)$$

式中:  $K_1, K_2, K_3$  和  $K_4$ —变偏置放大系数,分别用来调整 4 个偏置函数的大小,通常取  $K_1 = K_2 = 0.5$ ,  $K_3 = K_4 = 1$ <sup>[5]</sup>;  $C$ —燃油调节滑阀的开度,%;  $G$ —空气调节滑阀的开度与风/油转换函数之积。

当锅炉处于稳定运行状态,空燃比等于给定值,蒸汽压力调节器输出信号  $A$  作为燃油流量调节回路和空气压力调节回路的输入信号对系统进行控制。

当锅炉升负荷时,信号  $A$  增大,在空气压力调节回路中, $A > K$  时,低值选择器 LS2 选通  $K$ ;同时  $K > D$ ,高值选择器 HS1 选通  $K$ , $K$  再经过  $f_1(x)$  计算后作为空气压力调节回路的给定值,交叉限制开始。当  $K$  增大到  $K > A$  时,低值选择器 LS2 选通  $A$ ;同时  $A > D$ ,高值选择器 HS1 又选通  $A$ , $A$  再经过  $f_1(x)$  计算后作为空气压力的给定值,交叉限制结束。在燃油流量调节回路中, $A > H$ ,高值选择器 HS2 选通  $A$ ;同时  $A > B$ ,低值选择器 LS1 选通  $B$ , $B$  作为燃油流量调节回路的给定值,交叉限制开始。当  $B$  增大到  $B > A$  时,同时  $A > H$ ,高值选择器 HS2 选通  $A$ ,低值选择器 LS1 选通  $A$ , $A$  作为燃油流量调节回路的给定值,交叉限制结束。此时,升负荷过程结束,在升负荷过程中,空气压力和燃油流量交替增加。

当锅炉降负荷时,信号  $A$  减小, $D$  作为空气压力调节回路的给定值, $H$  作为燃油流量调节回路的给定值,交叉限制开始。随着空气压力和燃油流量交替减小, $A$  重新作为空气压力和燃油流量的给定值,交叉限制结束。此时,降负荷过程结束,在降负荷过程中,空气压力和燃油流量交替减小。

由式(1)~式(4)可知,变偏置函数  $f_7(x)$  的设置会影响偏置函数的取值。 $f_7(x)$  的取值受蒸汽压力测量值与设定值的偏差值影响, $f_7(x)$  取值越大,控制系统响应越快,空燃比也越大; $f_7(x)$  取值越小,控制系统响应越慢,空燃比也越小,其最佳取值范围为  $4.0\% < f_7(x) < 16.0\%$  [6]。

## 2 改进的变偏置双交叉限幅燃烧控制

### 2.1 偏置函数的模糊控制算法设计

变偏置函数  $f_7(x)$  的取值会影响偏置函数的取值,因此使用模糊控制算法针对  $f_7(x)$  进行优化,使  $f_7(x)$  的取值可以随着蒸汽压力测量值和给定值的偏差进行动态调整,从而实现对偏置函数的动态调整。

模糊控制器主要由 4 部分组成,分别为模糊化器、规则库、推理机和模糊消除器 [7]。在变偏置函数  $f_7(x)$  的优化设计中,以蒸压力测量值和设定值之间的偏差  $e$  以及偏差的变化率  $e_c$  作为模糊控制

器的输入,偏差  $e$  的单位为 MPa,偏差的变化率  $e_c$  的单位为 MPa/s,变偏置函数  $f_7(x)$  为模糊控制器的输出。

蒸汽压力的偏差值  $e$  的取值为  $-5 \sim 5$  MPa,偏差变化率  $e_c$  的取值为  $-0.75 \sim 0.75$  MPa/s,模糊控制器的输出变偏置函数  $f_7(x)$  的取值为  $[-0.18, +0.18]$ 。偏差值  $e$ 、偏差的变化率  $e_c$  与变偏置函数  $f_7(x)$  的模糊论域均取  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ,对应的模糊集为  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。模糊控制器的输出应大于零,在实际仿真中需要加绝对值输出。通过引入量化因子和比例因子实现输入量实际论域和离散论域互换 [8],在计算比例因子时需加绝对值,得到公式:

$$k_e = \frac{2m}{e_H - e_L} = \frac{2 \times 3}{5 - (-5)} = 0.6 \quad (5)$$

$$k_{e_c} = \frac{2n}{e_{cH} - e_{cL}} = \frac{2 \times 3}{0.75 - (-0.75)} = 4 \quad (6)$$

$$k_u = \frac{u_H - u_L}{2l} = \frac{0.18 - (-0.18)}{2 \times 3} = 0.06 \quad (7)$$

式中: $k_e$ —偏差量化因子; $k_{e_c}$ —偏差变化率量化因子; $k_u$ —比例因子; $e_H$ —偏差高限; $e_L$ —偏差低限; $e_{cH}$ —偏差变化率高限; $e_{cL}$ —偏差变化率低限; $u_H$ —输出高限; $u_L$ —输出低限; $m, n, l$ —论域上限。

$e, e_c$  和  $f_7(x)$  的隶属度函数如图 2 所示。

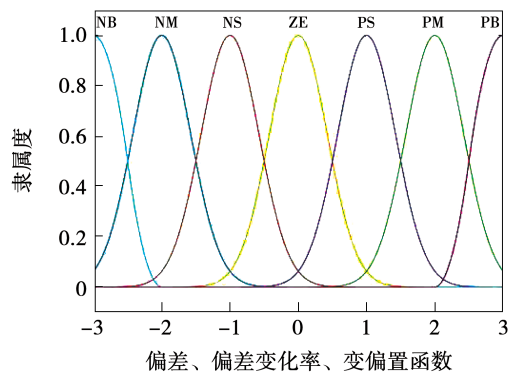


图 2 模糊变量  $e, e_c$  和  $f_7(x)$  隶属度函数

Fig. 2 Membership function of fuzzy variables of  $e, e_c$  and  $f_7(x)$

$e, e_c$  和  $f_7(x)$  的模糊输出器输出曲面如图 3 所示。

模糊控制规则以蒸汽压力偏差值和偏差值的变化率为依据。若  $e$  和  $e_c$  都为“负大”,此时误差较大,

且误差的变化率较大,所以需要将误差值减小,应该尽可能加快系统的响应速度。因此,输出的  $f_7(x)$  应为“正大”,具体的模糊控制规则如表 1 所示。

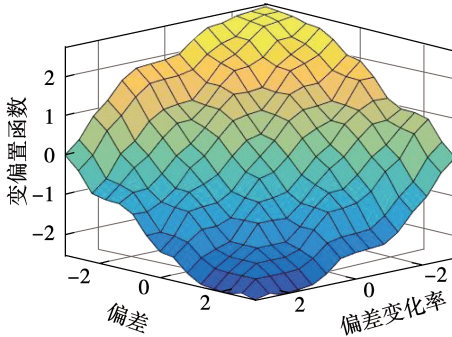


图 3 模糊输出器输出曲面

Fig. 3 Fuzzy controller output surface

表 1 变偏置函数模糊控制规则

Tab. 1 Variable offset function fuzzy control rule

$f_7(x)$	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	PS
NM	PB	PB	PM	PS	PS	PS	NM
NS	PB	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
$e$	ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
PS	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NB
PM	PM	PS	NS	NS	NM	NB	NB
PB	PS	NM	NS	NM	NB	NB	NB

### 2.2 基于遗传算法的控制器设计

采用遗传算法对燃油流量调节器和空气压力调节器两个 PI 控制器进行参数优化,并采用 Smith 预估控制法进行控制器结构优化。

在控制器参数优化设计中,目标函数的设置十分重要,需要通过判别适应度值来确定其最优解。由于控制系统既要保证蒸汽压力的响应速度,又要保证合理的空燃比,所以目标函数采用多目标的优化方法。为了保证蒸汽压力调节的快速性和稳定性,采用蒸汽压力的误差绝对值积分性能指标和空燃比误差绝对值积分性能指标作为参数选择的最小目标函数。为了防止优化结果走向极端,对误差绝对值作开方处理,目的是为了强化系统的抗干扰能力,弱化算法对系统响应速度的优化,防止算法优化的结果过度追求系统的响应速度,而忽略了超调量

和抗干扰能力。具体的目标函数为:

$$J(t) = \int_0^{\infty} \sqrt{|e(t)|} dt + \omega \int_0^{\infty} |e_a(t)| dt \quad (8)$$

式中: $J(t)$ —目标函数; $e$ —蒸汽压力偏差,MPa; $e_a$ —空燃比偏差; $t$ —时间, $s$ ; $\omega$ —权值,取值可根据实际情况进行调整,其取值应大于零,这里取  $\omega = 30$ 。

采用编程的方式实现遗传算法对控制器参数的优化,遗传算法采用二进制编码,待优化的参数有 4 个,即空气压力调节器的比例系数和积分系数,以及燃油流量调节器的比例系数和积分系数,根据经验设置 4 个待优化参数的上、下限。空气压力调节器的比例系数范围  $[0.1, 2]$ ,积分系数范围  $[0.01, 0.2]$ ;燃油流量调节器的比例系数范围  $[0.1, 5]$ ,积分系数范围  $[0.01, 1]$ 。遗传算法一般用于最大值寻优,在本文则需要进行最小值寻优,因此在进行参数寻优时,需要对目标函数作如下处理:

$$F(t) = \frac{1}{J(t)} \quad (9)$$

式中: $F(t)$ —适应度函数。

初始种群在上、下限范围内随机产生,种群规模设置为 100,交叉概率设置为 0.6,变异概率为 0.001,终止进化代数为 50。

由于燃油流量调节回路和空气压力调节回路都具有纯延迟环节,使系统的稳定性降低。为了进一步优化控制系统的稳定性,采用 Smith 预估控制算法对控制器结构进行优化。其原理为,将纯延迟环节移到控制回路之外,使反馈信号没有延迟,并在 PI 控制器上并接补偿环节,该环节称为 Smith 预估器<sup>[9]</sup>。Smith 预估控制算法的原理如图 4 所示。

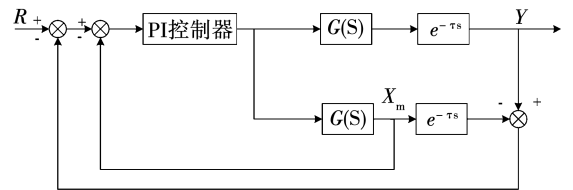


图 4 Smith 预估控制算法原理图

Fig. 4 Diagram of Smith predictive control algorithm

图 4 中  $R$  为输入, $Y$  为输出, $X_m$  为反馈信号, $G(S)$  为被控对象的传递函数, $e^{-Ts}$  为纯延迟环节。

### 2.3 改进的燃烧控制算法仿真设计

基于 Smith 预估控制和遗传算法优化的燃烧控制系统是利用模糊控制器动态输出变偏置函数  $f_7(x)$  来达到动态改变偏置函数的目的,同时利用遗传算法来优化燃油流量调节器和空气压力调节器的控制参数,即燃油流量调节器和空气压力调节器的比例系数与积分系数。

燃烧控制系统的控制对象包括蒸汽压力、燃油流量和空气压力 3 部分。燃油流量调节阀与燃油流量之间可以近似成线性关系,燃煤锅炉入口燃料量与出口蒸汽压力之间的关系以及空气入口量与出口空气压力的关系可以近似为 1 个一阶延迟系统<sup>[10-12]</sup>。根据实验时的锅炉运行数据,最终确定蒸汽锅炉的数学模型为:

$$G_1(s) = 0.0247e^{-0.5s} \quad (10)$$

$$G_2(s) = \frac{0.96e^{-9s}}{13s + 1} \quad (11)$$

$$G_3(s) = \frac{3.15e^{-3.52s}}{11s + 1} \quad (12)$$

式(10)的输入为燃油流量调节阀的开度信号,单位为%,输出为燃油流量,单位为 kg/s。式(11)的输入是燃油流量,单位是 kg/s,输出是蒸汽压力,单位为 MPa。式(12)的输入为空气压力调节阀的开度信号,单位为%,输出为空气压力,单位为 kPa。

改进前的传统变偏置双交叉限幅燃烧控制系统与改进后的燃烧控制的偏置函数保持一致,均取偏置函数  $f_7(x)$  为 0.10,  $K_1 = K_2 = 0.5$ ,  $K_3 = K_4 = 1$ , 油/风转换函数  $f_1(x) = 1.25x$ , 风/油转换函数  $f_2(x) = 0.8x$ 。

仿真以阶跃信号为输入,对工程中常用的两个工况进行仿真,即蒸汽压力由 3.8 MPa 升负荷到 5.6 MPa,以及由 5.6 MPa 降负荷到 3.8 MPa,两个过程,并加入一定扰动。仿真时间设置为 1 000 s,并在 200 s 时进行升负荷变化,700 s 时进行降负荷变化。

### 3 仿真结果及分析

传统方法和改进方法的蒸汽压力、燃油流量及

空气压力升降负荷调节过程仿真曲线如图 5 ~ 图 7 所示。

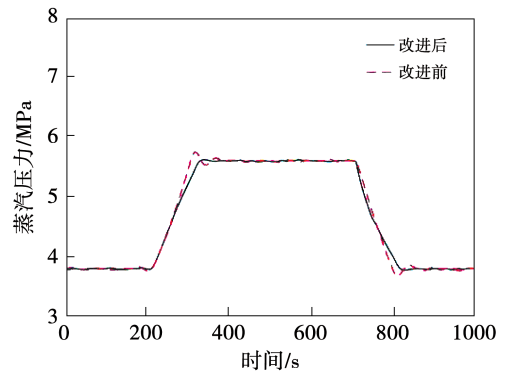


图 5 蒸汽压力调节过程

Fig. 5 Steam pressure regulation process

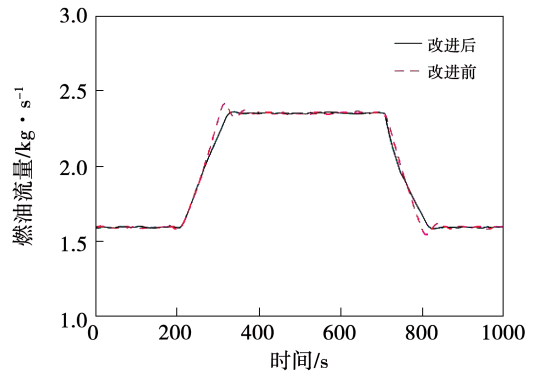


图 6 燃油流量调节过程

Fig. 6 Fuel flow regulation process

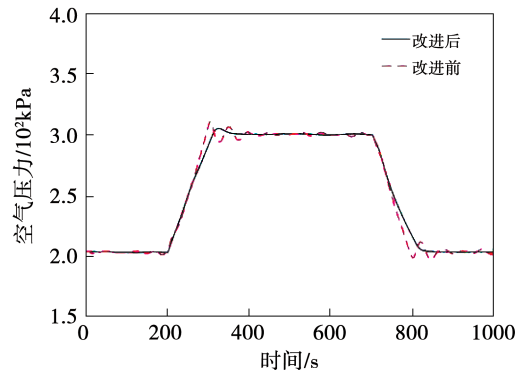


图 7 空气压力调节过程

Fig. 7 Air pressure regulation process

由图 5 ~ 图 7 可以看出,相比于传统方法,改进方法在加入一定扰动后,蒸汽压力、燃油流量以及空气压力在升降负荷的调节过程中产生的波动更小,超调量也更小。虽然信号上升时间(稳态值 10% ~

90%)略有增加,但进入稳定区间(±2%)的调节时间更短。在系统稳定后,由于扰动而产生的波动也更小,使用改进方法的系统具有更好的控制性能和抗干扰能力。具体控制参数的仿真结果如表2所示。

表2 控制参数仿真结果

Tab. 2 Simulation results of control parameters

控制指标	传统方法	改进方法
蒸汽升负荷调节/s	132.800	117.849
蒸汽升负荷超调/%	2.7	0.4
蒸汽升负荷上升时间/s	75.749	86.056
燃油升负荷调节/s	132.784	120.260
燃油升负荷超调/%	2.8	0.4
燃油升负荷上升时间/s	75.749	89.046
空气升负荷调节/s	128.957	110.868
空气升负荷超调/%	3.7	1.7
空气升负荷上升时间/s	78.942	87.868
蒸汽降负荷调节/s	135.858	112.594
蒸汽降负荷超调/%	3.1	0.5
蒸汽降负荷上升时间/s	72.875	88.273
燃油降负荷调节/s	128.288	110.807
燃油降负荷超调/%	3.3	0.8
燃油降负荷上升时间/s	71.183	88.273
空气降负荷调节/s	138.150	105.754
空气降负荷超调/%	2.7	0
空气降负荷上升时间/s	74.358	89.447

由表2可知,对于升负荷过程,蒸汽压力调节时间缩短了14.951 s,超调量减小了2.3%,上升时间增加了10.307 s;燃油流量调节时间缩短了12.724 s,超调量减小了2.4%,上升时间增加了13.297 s;空气压力调节时间缩短了18.089 s,超调量减小了2.0%,上升时间增加了8.926 s。

对于降负荷过程,蒸汽压力调节时间缩短了23.264 s,超调量减小了2.6%,上升时间增加了15.398 s;燃油流量调节时间缩短了17.481 s,超调量减小了2.5%,上升时间增加了17.090 s;空气压力调节时间缩短了32.396 s,超调量减小了2.7%,上升时间增加了15.089 s。

传统方法和改进方法的空燃比曲线如图8所示。

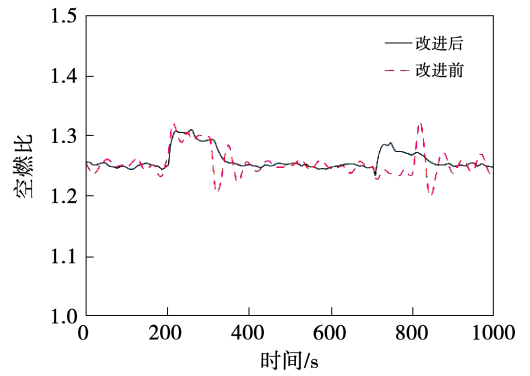


图8 空燃比仿真曲线

Fig. 8 Air fuel ratio simulation curve

由图8可以看出,改进后的燃烧控制方法可以有效地减少空燃比的波动,空燃比的波动幅度也更小,相比于传统方法具有更好的稳定性。

当燃油蒸汽锅炉运行一段时间后,控制模型会发生一定的变化,因此需要进行鲁棒性分析。当系统的传递函数发生一定变化时,燃油流量部分、蒸汽压力部分、空气压力部分传递函数也会相应产生变化,如式(13)~式(15)所示:

$$G_4(s) = 0.023e^{-0.6s} \tag{13}$$

$$G_5(s) = \frac{0.9e^{-10s}}{10s + 1} \tag{14}$$

$$G_6(s) = \frac{2.8e^{-5s}}{15s + 1} \tag{15}$$

在其他参数不变的情况下对变化后的模型进行仿真,对比变化前后在升降负荷时蒸汽压力的调节过程,如图9所示。

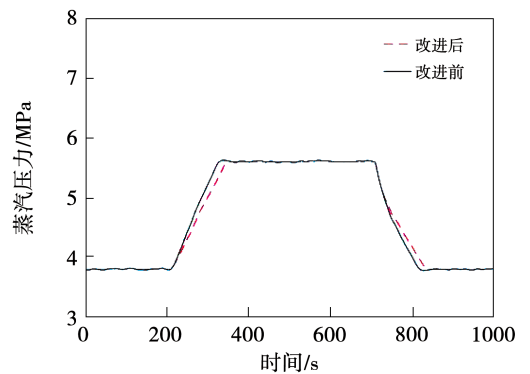


图9 蒸汽压力调节过程对比

Fig. 9 Comparison of steam pressure regulation process

由图9可以看出,在对模型进行一定改变后,上升时间和调节时间有小幅增加,但控制效果依然能

满足系统的控制要求。改进后的燃烧控制系统具有较好的鲁棒性,可以应对被控对象传递函数出现微小变化的情况。

综上所述,虽然改进后的燃烧控制方法一定程度上增加了系统的上升时间,但整体上系统进入稳态的调节时间更短,且超调量更小,空燃比波动幅度更小,稳定性更强。并且改进后的控制系统具有较好的鲁棒性,可以满足燃烧控制系统对快速性、稳定性和鲁棒性的要求。

## 4 结 论

本文提出一种基于 Smith 预估控制和遗传算法优化的燃油蒸汽锅炉燃烧控制方法,并对仿真结果进行了对比分析,得到结论:

(1) 在锅炉升降负荷时,相比于传统方法,改进方法的蒸汽压力、燃油流量和空气压力 3 个被控对象的上升时间略有增加,但调节过程的波动更小,总体的调节时间减短,且超调量大幅减小。相比于传统方法,改进后的方法在快速性、稳定性两方面均有提升,控制系统的动态性能有所提高,且具有良好的鲁棒性。

(2) 在锅炉升降负荷时,相比于传统方法,改进方法的空燃比波动更小,燃烧过程更加稳定。

## 参考文献:

[1] 朱齐丹,张静巧,张 好. 基于遗传算法改进的变偏置双交叉限幅燃烧控制系统设计[C]//北京:2013 第一届中国指挥控制大会论文集,2013.  
ZHU Qi-dan, ZHANG Jing-qiao, ZHANG Hao. Design of variable offset double cross limiting combustion control system based on genetic algorithm[C]//Beijing: Proceedings of the First China Command and Control Conference, 2013.

[2] 周恒龙,赵 赛. 单交叉限幅控制在邯钢连续退火炉上的应用[C]//青岛:钢铁企业设备故障远程诊断技术与无损检测交流会议论文集,2014.  
ZHOU Heng-long, ZHAO Sai. Application of single cross limiting control in continuous annealing furnace of Hangang[C]//Qingdao: Proceedings of the Exchange Conference on Remote Fault Diagnosis Technology and Nondestructive Testing in Iron and Steel Enterprises, 2014.

[3] 周 俊. 热风炉燃烧控制中的单交叉限幅[J]. 自动化与仪器仪表, 2000, 5(3): 54-55.

ZHOU Jun. Single cross limiting in combustion control of hot blast furnace[J]. Automation and Instrumentation, 2000, 5(3): 54-55.

[4] 李来春,邓彩霞,杨明极. 变偏置双交叉限幅燃烧控制系统设计及应用研究[J]. 热能动力工程, 2003, 18(2): 183-187.  
LI Lai-chun, DENG Cai-xia, YANG Ming-ji. The design and applied research of a combustion control system featuring variable offset and dual-cross amplitude limit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(2): 183-187.

[5] 李来春,许松男,郎术斌,等. 蒸汽动力主锅炉燃烧控制系统设计及应用[J]. 热能动力工程, 2000, 15(2): 175-177.  
LI Lai-chun, XU Song-nan, LANG Shu-bin, et al. Main boiler combustion control system of a steam power propulsion plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2000, 15(2): 175-177.

[6] 李来春. 船用主锅炉燃烧控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2003.  
LI Lai-chun. Research on combustion control system of marine main boiler[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2003.

[7] 董祥林. 飞行器模糊控制算法的设计与实现[D]. 南京:东南大学, 2017.  
DONG Xiang-lin. Design and implementation of fuzzy control algorithm for aircraft[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[8] 王 荣. 基于模糊神经网络的锅炉汽包水位控制系统研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2015.  
WANG Rong. Research on boiler drum water level control system based on fuzzy neural network[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015.

[9] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2016.  
LIU Jin-kun. Advanced PID control MATLAB simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.

[10] 杨宇婷. 基于粒子群算法的工业锅炉炉膛燃烧优化控制[D]. 西安:西安科技大学, 2019.  
YANG Yu-ting. Optimal control of industrial boiler furnace combustion based on particle swarm optimization algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.

[11] 王正林,王胜开. MATLAB/Simulink 与控制系统的仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.  
WANG Zheng-lin, WANG Sheng-kai. MATLAB/Simulink and control system simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.

[12] 周俊杰,房全国,王定标. 基于 MATLAB/Simulink 的燃烧控制过程系统仿真[J]. 郑州大学学报, 2012, 33(2): 51-54.  
ZHOU Jun-jie, FANG Quan-guo, WANG Ding-biao. Simulation of combustion control process system based on MATLAB / Simulink[J]. Journal of Zhengzhou University, 2012, 33(2): 51-54.