

文章编号: 1000-8152(2007)01-0137-06

聚焦式模糊变结构控制及其在主汽温控制中的应用

杨 苹, 许礼尉

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对具有纯滞后、大惯性、参数漂移大的非线性复杂系统, 本文提出一种聚焦式模糊变结构控制算法, 使系统在多种干扰下具有较强鲁棒性的同时, 具有较快的响应速度. 控制器采用偏差 e 、偏差变化速率 $\frac{de}{dt}$ 和偏差累积 $\int edt$ 作为输入信号, 利用聚焦式量化算法对这3个输入论域进行离散化, 模糊化后采用模糊变结构算法对三维输入进行二维的模糊推理, 大大简化了模糊推理的过程. 仿真结果表明: 新算法具有很好的动态品质, 可以有效地消除系统的稳态误差. 该算法在广东某电厂2#机组锅炉的汽温控制系统中得到成功的应用, 其控制效果良好.

关键词: 模糊控制; 变结构; 聚焦; 主汽温控制

中图分类号: TP273.2 **文献标识码:** A

Focusing variable structure fuzzy control and its application to steam temperature control of a boiler

YANG Ping, XU Li-wei

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: In order to control the complex nonlinear system effectively, a focusing variable structure fuzzy control algorithm is presented in this paper. Firstly, the variable error e , its derivative $\frac{de}{dt}$ and its integral $\int edt$ are regarded as input. A focusing discretization algorithm is then applied to discretize these three input variables, and these three input variables are also fuzzed up to fuzzy sets respectively. Furthermore, a variable structure fuzzy control algorithm is applied to do 2-dimension reasoning by using 3-dimension input variables, the reasoning process is simplified greatly. Simulation result shows that the new control system has good dynamic quality and its steady error is eliminated. The proposed algorithm is applied to a steam temperature control for a boiler in a power plant of Guangdong Province, the practical control effect is proved to be satisfactory.

Key words: fuzzy control; variable structure; focusing; steam temperature control

1 引言(Introduction)

现代复杂的工业过程往往具有强非线性、分布参数、时变等特性, 难以建立精确的数学模型, 智能化控制为这类对象的控制开辟了一条实用化的途径^[1], 其中的模糊控制在工业领域中最为常用. 模糊控制器利用模糊隶属函数和模糊推理合成法则, 将人们的直觉经验应用于复杂对象的控制中, 不但避免建立被控对象的精确数学模型, 并使控制系统具有较强的鲁棒性. 对于具有纯滞后、大惯性、参数漂移大的非线性不确定分布参数的系统, 人们试图通过诸如自适应、自学习和混合控制策略来提高模糊控制系统的性能, 取得了较好的效果, 不足的是算法过于复杂^[2~5], 难以在工程上实现. 于是, 对于具有纯滞后、大惯性、参数漂移大的非线性复杂对象

的控制, 实际工程中得到广泛应用的仍是二输入的模糊PD控制器.

模糊PD控制器对偏差和偏差变化率分级进行控制, 每级均根据被控对象的特性设置有效控制量对被控对象实施有效的控制, 但不具备消除稳态误差的能力. 于是文[3]在常规PD型模糊控制系统的基础上, 通过引入积分环节以消除被调量的稳态偏差. 不过, 这种并联型PID模糊控制器的结构复杂度提高了, 而且在被调量的偏差较大时, 其动态品质不如单一的PD模糊控制器, 在接近稳态时, 其消除稳态偏差的能力不如常规PI控制器.

为了对具有纯滞后、大惯性、参数漂移大的非线性不确定分布参数的系统实施有效的控制, 使其动态品质良好的同时, 消除其稳态误差, 本文提出一种

聚焦式模糊变结构控制算法,使复杂被控对象的被调量偏差较大时有足够快的响应速度,在接近稳态时迅速消除其稳态误差.仿真结果表明:新算法具有很好的动态品质,还可以消除系统的稳态误差.该算法在广东某电厂2#机组锅炉的汽温控制系统中得到成功的应用,其控制效果良好.

2 聚焦式模糊变结构控制器(Focusing variable structure fuzzy controller)

对于模糊PD控制器而言,要提高其精度和跟踪性能,必须对偏差和偏差变化率进行更多的分级,分级越细,控制精度越高,控制性能越好.但过细的划分将增加模糊规则的数目和控制器的实时计算量,控制器的实时性难以满足要求.而且,无论其分级多细,仍然无法消除系统的稳态误差.为了使控制系统既有良好的动态品质,也能消除稳态误差,有人提出采用模糊PID控制器,即采用被调量的偏差、偏差变化速率和偏差的积累作为输入来提高控制系统的性能.但是,输入维数的增加导致了控制规则和控制算法的复杂化,至今没有有效的方法解决多维控制规则的冗余性和兼容性,因此三维及三维以上的模糊控制器并不多见.另外,考虑到语言变量基本论域的量化特点,模糊PID控制器在“零(\tilde{Z})”档量化死区可能出现稳态等幅振荡.

于是,二维的模糊PD控制器仍是模糊控制器的主流.为了消除控制系统的稳态误差,文[3]采用了复合模糊串级控制的方式,当偏差较大时,利用模糊PD控制保证系统响应的快速性,当偏差较小时,利用一个并联的常规PI控制器消除稳态误差.这类控制方式需要两个控制器同时协调完成控制任务,在偏差的整个范围内两个控制器之间不进行切换而同时工作,所以在被调量的偏差较大时,由于常规PI控制作用考虑了偏差累计的影响使其动态品质不如单一的PD模糊控制器;在接近稳态时,由于模糊PD控制器依然以其原来的方式工作使其消除稳态偏差的能力不如常规PI控制器.若在两个控制器之间进行切换,还需要增加一个控制切换的控制器,增加了系统的复杂度.在提高二维模糊PD控制器的响应速度方面,文[5]在输出的模糊判决中引入了修正因子,通过模糊目标(如偏差大小)来在线调整修正因子,从而修改控制规则,使得偏差大时的响应速度加快.然而,作为二维的模糊控制器,一直无法保证在快速响应的同时消除稳态误差.

为了提高模糊控制器的性能,本文提出聚焦式模糊变结构控制算法,以二维模糊控制算法实现三维模糊PID控制的效果,并采用聚焦式变结构算法消除“零(\tilde{Z})”档处的极限环振荡.由该模糊变结构控制器实现的模糊控制系统的结构如图1所示.

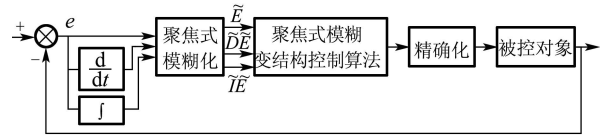


图1 聚焦式模糊变结构控制系统结构图

Fig. 1 Structure of focusing variable structure fuzzy control system

聚焦式模糊变结构控制器采用偏差 e 、偏差变化速率 $\frac{de}{dt}$ 和偏差的累积 $\int edt$ 作为输入信号,利用聚焦式量化算法对输入论域进行离散化,模糊化后利用模糊变结构算法进行模糊推理,其变结构体现在:根据偏差 e 及其变化率 \dot{e} 的组合不同,控制作用将在两种模糊控制规则表之间切换:当偏差 e 及其变化率 \dot{e} 不落在“零(\tilde{Z})”档时,采用聚焦式模糊PD控制规则表;当 e 及其变化率 \dot{e} 都落在“零(\tilde{Z})”档时,系统已接近稳态,这时采用聚焦式模糊PID控制规则表,引入偏差的累积 $\int edt$ 作为控制器的输入信号以消除稳态误差.

2.1 输入量的聚焦式模糊化(Focusing fuzziness for input variables)

输入量的模糊化过程的主要任务是:确定输入变量的测量范围,将其作为输入论域,对输入论域进行离散化;然后在离散的论域上为每个输入变量定义若干个模糊子集.理论上,在输入变量的论域上定义的模糊子集越多,控制性能越好.然而过多的模糊子集将使模糊规则的数目迅速增加,控制器的实时性变差.为此,本文采用聚焦式量化算法实现输入论域的离散化,以合理分配各个偏差段的分辨率,提高控制系统的性能.

以输入变量 e 为例,聚焦式量化算法的实现步骤是:

- 1) 根据被控对象的实际情况,为输入变量 e 选择一个合适的聚焦因子 F_e , $F_e \in (0, 1)$;
- 2) 确定输入变量 e 的论域范围 $[-e, e]$ 及其量化等级,不失一般性,将量化等级设为 $2n$;
- 3) 对输入论域的一半 $[0, e]$ 以 F_e 的递减规律分成 n 个不均匀段,其分段点分别是:

$$\begin{aligned} & e \times F_e, \\ & e \times (1 - F_e) \times F_e = e \times F_e - e \times (F_e)^2, \\ & e \times (1 - (1 - F_e) \times F_e) \times F_e = \\ & e \times F_e - e \times (F_e)^2 - e \times (F_e)^3, \\ & \vdots \\ & e \times F_e - e \times (F_e)^2 - e \times (F_e)^3 - \dots - e \times (F_e)^{n-1}. \end{aligned}$$

- 4) 同理,对输入论域另一半 $[-e, 0]$ 也以 F_e 的递减规律分成 n 个不均匀段,其分段点分别是3)的分段

点值的负数。

这样, 输入变量 e 在整个论域范围 $[-e, e]$ 内就以 F_e 的递减规律被分成 $2n$ 个不均匀段。同理, 可以将另外两个输入变量 $\frac{de}{dt}$ 和 $\int edt$ 在对应的论域范围内 $[-\dot{e}, \dot{e}]$, $[-\int edt, \int edt]$, 以设定的聚焦因子 F_e 和 $F_{\dot{e}}$, 递减地分成设定的若干个不均匀段。这种聚焦式分段将大大提高小偏差的分辨率, 稍稍降低了大偏差的分辨率, 但是, 总的量化噪声大大降低^[6]。

在采用聚焦式量化算法实现输入论域的离散化后, 就可以在离散的论域上为每个输入变量定义若干个模糊子集。这时, 由于量化噪声比传统的量化方法的量化噪声大大降低了, 当在离散论域上划分的模糊子集个数相同时, 控制系统的性能也比采用传统量化方法的控制系统性能优越。

以输入输出论域均定义5个模糊子集为例, 即 $\tilde{P}\tilde{B}$, $\tilde{P}\tilde{S}$, \tilde{Z} , $\tilde{N}\tilde{S}$, $\tilde{N}\tilde{B}$, 若量化等级均为16, 则输入输出论域所定义的5个模糊子集可以采用三角形隶属函数表示, 如图2示。

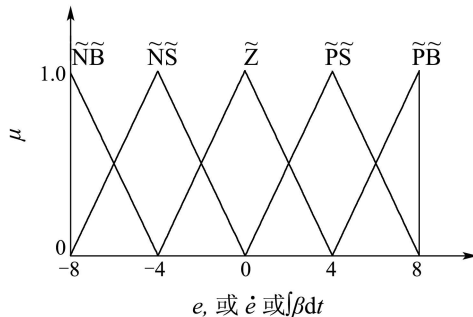


图 2 模糊子集的隶属函数图

Fig. 2 Membership function of e, \dot{e} or $\int edt$

下面以图2所示的模糊子集定义方式为例, 说明聚焦式模糊变结构控制的基本原理。开始工作时, 聚焦式模糊变结构控制器首先检测偏差 e 及其变化率 \dot{e} , 只要其中一个不落在“零(\tilde{Z})”档时, 启用下节介绍的聚焦式模糊PD控制规则表。

2.2 聚焦式模糊PD控制规则表(Focusing fuzzy PD control table)

采用聚焦式量化算法实现输入/输出论域离散化, 假设离散化为16级, 在离散论域上各定义5个模糊子集如图2所示, 则聚焦式模糊PD控制规则表可以表示为表1。它与普通模糊PD控制规则表的实质区别在于: 当偏差 e 及其变化率 \dot{e} 落在“零(\tilde{Z})”档时, 跳转到聚焦式模糊PID控制规则表。

由于对偏差进行了聚焦, 使偏差大时控制力度较大, 从而提高系统的响应速度, 快速减小系统误差, 使偏差 e 及其变化率 \dot{e} 快速落入“零(\tilde{Z})”档。利用表1进行工作中, 聚焦式模糊变结构控制器一旦检测到 e 及 \dot{e} 均落在“零(\tilde{Z})”档时, 跳转表2。

表 1 一种聚焦式模糊PD控制规则表

Table 1 A focusing fuzzy PD control table

$\tilde{D}\tilde{E}$	\tilde{E}				
	$\tilde{N}\tilde{B}$	$\tilde{N}\tilde{S}$	\tilde{Z}	$\tilde{P}\tilde{S}$	$\tilde{P}\tilde{B}$
$\tilde{N}\tilde{B}$	$\tilde{P}\tilde{B}$	$\tilde{P}\tilde{B}$	$\tilde{P}\tilde{B}$	$\tilde{P}\tilde{S}$	\tilde{Z}
$\tilde{N}\tilde{S}$	$\tilde{P}\tilde{B}$	$\tilde{P}\tilde{S}$	$\tilde{P}\tilde{S}$	\tilde{Z}	$\tilde{N}\tilde{S}$
\tilde{Z}	$\tilde{P}\tilde{B}$	$\tilde{P}\tilde{S}$	转表2	$\tilde{N}\tilde{S}$	$\tilde{N}\tilde{B}$
$\tilde{P}\tilde{S}$	$\tilde{P}\tilde{S}$	\tilde{Z}	$\tilde{N}\tilde{B}$	$\tilde{N}\tilde{S}$	$\tilde{N}\tilde{B}$
$\tilde{P}\tilde{B}$	\tilde{Z}	$\tilde{N}\tilde{S}$	$\tilde{N}\tilde{B}$	$\tilde{N}\tilde{B}$	$\tilde{N}\tilde{B}$

2.3 聚焦式模糊PID控制规则表(Focusing fuzzy PID control table)

采聚焦式模糊PID控制规则表通过引入偏差的累积 $\int edt$ 作为控制器的输入以消除稳态误差。启用本控制表时, 偏差 e 及其变化率 \dot{e} 都处于“零(\tilde{Z})”档, 此时, 为消除稳态误差, 控制量 U 的最大/最小值比表1中的 $\tilde{P}\tilde{B}$, $\tilde{N}\tilde{B}$ 对应值小得多, 因此, 需要重新设置此时的控制量 U 论域, 设为 $[-zu, zu]$, 也采用聚焦式量化算法对论域 $[-zu, zu]$ 实现离散化。进行量化时, 需要考虑控制量 u 的最小非零值以便消除由于较大的“零(\tilde{Z})”档量化死区造成的极限环振荡。因此, 对于对控制量论域 $[-zu, zu]$ 采用聚焦式量化实现离散化时, 离散化的等级和聚焦因子的选择要由控制量 u 的最小非零值来确定, 本文采用仿真试探方式的方法得到 u 的最小非零值。另外, 启用本控制表时, e 及 \dot{e} 都处于零档, 所以对于偏差的累积 $\int edt$, 其论域是指 e 及 \dot{e} 都处于零档时的最大变化范围 $[-\int edt, \int edt]$ 。

沿用上节2.2中的假设, 所有输入变量都离散化为16级, 所定义的5个模糊子集仍如图2所示。此例中, 对控制量 U 的 $[-zu, zu]$ 论域也假设采用聚焦式量化离散化为16级, 所定义的5个模糊子集仍如图3所示。则采用专家经验得到的一种聚焦式模糊PID控制规则表可以表示为表2。

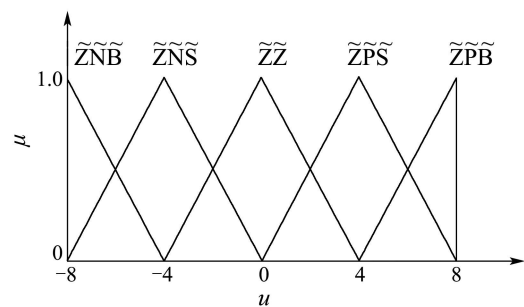


图 3 e 及 \dot{e} 处于 \tilde{Z} 档时控制量 u 的模糊子集隶属函数图
Fig. 3 Membership function of u when e and \dot{e} belong to \tilde{Z}

由于表2中的控制量 u 的论域 $[-zu, zu]$ 相比于表1的 $[-u, u]$ 范围小得多, 对其采用聚焦式量化算

法量化时专门考虑了控制量 u 的最小非零值. 因此, 可以通过调整聚焦因子 F_u , 使控制量 u 的论域 $[-zu, zu]$ 被划分为合理的等级, 消除由于较大的“零(\tilde{Z})”档量化死区造成的极限环振荡, 同时避免了对控制量 u 进行过度划分造成的控制规则选择困难.

表2 一种聚焦式模糊PID控制规则表
Table 2 A focusing fuzzy PID control table

$\tilde{E}, \tilde{D}\tilde{E}$	$\tilde{I}\tilde{E}$				
	$\tilde{N}\tilde{B}$	$\tilde{N}\tilde{S}$	\tilde{Z}	$\tilde{P}\tilde{S}$	$\tilde{P}\tilde{B}$
	\tilde{Z}	$\tilde{Z}\tilde{P}\tilde{B}$	$\tilde{Z}\tilde{P}\tilde{S}$	$\tilde{Z}\tilde{Z}$	$\tilde{Z}\tilde{N}\tilde{S}$

由表1和表2构成的聚焦式模糊变结构控制算法, 是利用一个控制器内部的两个简单的模糊控制规则表的转换实现变时滞变参数非线性被控对象的高品质控制, 可使控制系统响应快速, 同时消除稳态误差; 而规则表的转换在算法内部实现, 无需硬件开关的不断切换, 系统的实现简单而可靠.

3 仿真研究(Simulation)

一个良好的主汽温控制系统既要在负荷变化时具有较快的跟随速度, 又要在负荷稳定时具有良好的稳定性^[7]. 常规汽温控制系统为串级控制或前微分控制, 当机组稳定运行时, 一般能将主汽温控制在允许的范围内, 当运行工况变化较大致使主汽温对象的特性发生变化时, 很难保证控制品质. 为检验聚焦式模糊变结构控制算法的控制效果, 下面采用文献^[7]中的主汽温模型作为被控对象, 对常规串级控制、并联型PID模糊控制器和聚焦式模糊变结构控制器的控制效果进行仿真研究.

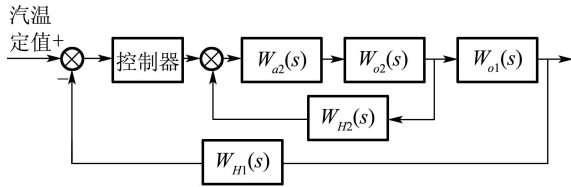


图4 汽温控制系统方框图

Fig. 4 Structure of steam temperature control system

图4中, 各模块的参数如下:

$$W_{a2}(s) = 25,$$

$$W_{H1}(s) = W_{H2}(s) = 0.1(\text{mA}/^\circ\text{C}),$$

$$W_{o1}(s) = \frac{1.125}{(25s + 1)^3},$$

$$W_{o2}(s) = \frac{8}{(15s + 1)^2} (^\circ\text{C}/\text{mA}).$$

仿真时的具体参数为: 汽温的偏差范围设定为 $[-15^\circ\text{C}, +15^\circ\text{C}]$, 偏差变化率的范围为 $[-2^\circ\text{C}/\text{s}, +2^\circ\text{C}/\text{s}]$, 控制输出的范围为 $[0 \text{ mA}, 10 \text{ mA}]$, 当 e 和

\dot{e} 落入零档后, 偏差积累的变化范围为 $[-4^\circ\text{Cs}, +4^\circ\text{Cs}]$, 控制输出的范围为 $[0 \text{ mA}, 2 \text{ mA}]$. 于是, 设定汽温偏差 e 的离散论域为 $[-11, 11]$, 汽温偏差变化率 \dot{e} 及控制作用 u 的离散论域为 $[-8, 8]$, 偏差的积累 $\int e dt$ 的离散论域为 $[-8, 8]$, 而此时控制作用论域 $[-zu, zu]$ 的离散论域依然取为 $[-8, 8]$, 聚焦因子全部选定为0.5. 在前四个论域上定义的模糊语言变量子集都是: PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB, 在 e 落在零档控制作用论域上定义的模糊语言变量子集是: ZPB, ZPM, ZPS, ZZ, ZNS, ZNM, ZNB. 其隶属函数的选取参考图2和图3, 控制规则如表3和表4.

表3 主汽温的聚焦式模糊PD控制规则表
Table 3 Focusing fuzzy PD control table for steam temperature

$\tilde{D}\tilde{E}$	\tilde{E}						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	Z
NM	PB	PB	PM	PM	PS	Z	NS
NS	PB	PM	PM	PS	NS	NS	NM
Z	PB	PM	PS	转表2	NS	NM	NB
PS	PM	PS	Z	NS	NM	NM	NB
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NB	NB
PM	Z	NS	NS	NB	NB	NB	NB

表4 主汽温的聚焦式模糊PID控制规则表
Table 4 Focusing fuzzy PID control table for steam temperature

$\tilde{E}, \tilde{D}\tilde{E}$	$\tilde{I}\tilde{E}$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	Z	ZPB	ZPM	ZPS	ZZ	ZNS	ZNM

控制器采用常规串级控制时, 控制器取比例积分作用, 即: $W_{a1}(s) = 2(1 + \frac{1}{74s})$, 这时, 系统超调 $\delta \approx 50\%$, $t_p \approx 165 \text{ s}$. 控制器采用并联型PID模糊控制器时, 取文献^[3]的复合模糊串级控制器, 其中的参数为: 主调模糊控制器的比例因子 $K_u = 0.8$, 量化因子 $K_e = 2.5$, $K_{ec} = 20$; 副调节器 $\delta_1 = 0.04$, $\delta_2 = 1$, $T_i = 40$; 这时, 系统超调 $\delta \approx 18\%$, $t_p \approx 157 \text{ s}$.

假定汽温的设定值信号作+1mA的阶跃变化, 所设计的聚焦式模糊变结构控制器与常规串级控制系统和并联型PID模糊控制器进行比较, 3个控制系统的动态响应如图5所示.

其中, 曲线1表示聚焦式模糊变结构控制系统的响应, 曲线2表示并联型PID模糊控制系统的响应, 曲线3则表示常规PID控制系统的响应. 从图中

不难看出,采用聚焦式模糊变结构控制器,系统超调 $\delta \approx 15\%$, $t_p \approx 107\text{s}$,此时的过热汽温不仅超调小,而且仅经过300 s就能达到稳定;相比较而言,并联型PID模糊控制系统超调稍大,达到稳态的时间为380 s;常规线性PID控制系统不仅超调大,而且要经过900 s才能真正达到稳态.这个结果比文献[2]的结果稍好一点,但实现方法得到大大简化.由此可见,聚焦式模糊变结构控制器具有良好的控制品质,更重要的是:聚焦式模糊变结构控制器采用一个模糊控制器,利用两个简单的模糊控制规则表的转换实现变时滞变参数非线性被控对象的高品质控制,规则表的转换在聚焦式模糊变结构控制算法内部实现,无需硬件开关的不断切换,而且每次控制只在一个简单的控制规则表内完成,控制器的硬件软件简单,实现方便可靠,实时性很强.

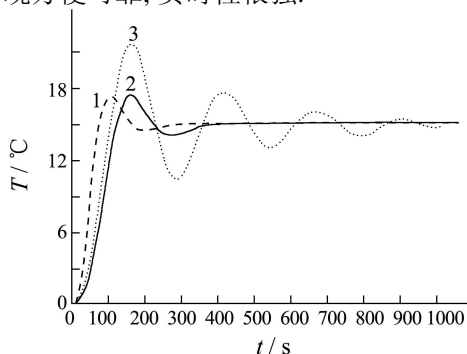


图5 3种控制系统的过热汽温响应图

Fig. 5 Response curve of three different control systems of steam temperature

4 应用实例介绍(Application example)

广东省某发电厂2#机组的锅炉的过热汽温控制系统采用的是常规的串级控制方案,由于被控对象的惯性较大,原控制系统不能取得满足运行要求的控制品质.我们将所设计的聚焦式模糊变结构控制器应用于该机组的过热汽温控制中,现场调试结果表明:聚焦式模糊变结构控制系统具有优良的控制品质,在运行工况发生变化时能实现全自动调节,其自动投入率和利用率均达100%,避免了原来在运行工况发生变化时需要运行人员手动干预才能完成调节的过程.

图6是一组现场调试的曲线,可以看到锅炉负荷变化时汽温控制系统的调节作用.

从图中曲线可以看出:在机组升负荷时,汽机调门会开大,造成锅炉的蒸汽流量增加,即锅炉负荷增加,因此在机组升负荷初期,主汽温度有小幅下降(不超过 2°C);随着锅炉燃烧控制系统的动作,锅炉过热器的对流传热显著增加,导致主汽温度快速回升.这时,聚焦式模糊变结构控制器检测到汽温的升速后采用喷水调节阀进行快速调节,有效地抑制

了汽温的上升幅度(升幅不超过 4°C).当锅炉减负荷时,汽机调门会开小,造成锅炉的蒸汽流量减小,即锅炉负荷减小,因此在机组减负荷初期,主汽温度有小幅上升(不超过 2°C);随着锅炉燃烧控制系统的动作,锅炉过热器的对流传热减小,导致主汽温度快速下降.这时,聚焦式模糊变结构控制器检测到汽温的减速后采用喷水调节阀进行快速调节,有效地抑制了汽温的下降幅度(降幅不超过 4°C).现场调试结果表明:在锅炉变负荷过程中,汽温的最大动态偏差较小,聚焦式模糊变结构控制器的控制效果良好.

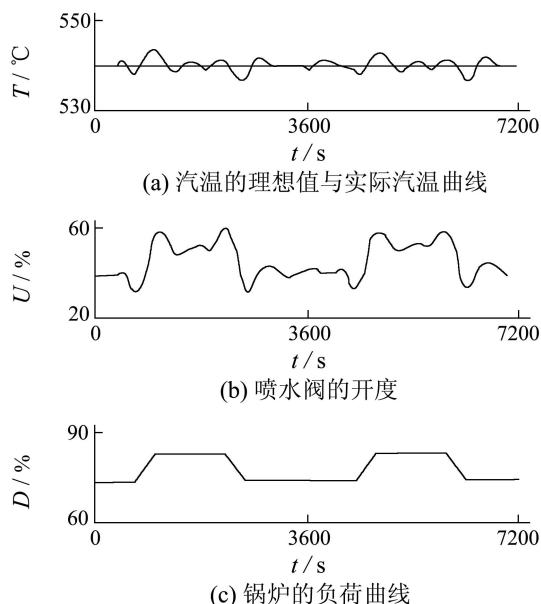


图6 聚焦式模糊变结构控制系统在锅炉升降负荷时的响应曲线

Fig. 6 Response curve of focusing variable structure fuzzy control system when load is changing

5 结论(Conclusion)

针对具有纯滞后、大惯性、参数漂移大的非线性不确定分布参数的系统,本文提出一种聚焦式模糊变结构控制算法,使系统在多种干扰下具有较强鲁棒性的同时,具有较快的响应速度.控制器采用偏差 e 、偏差变化速率 $\frac{de}{dt}$ 和偏差累积 $\int e dt$ 作为输入信号,利用聚焦式量化算法对这3个输入论域进行离散化,模糊化后采用模糊变结构算法对三维输入进行二维的模糊推理,大大简化了模糊推理的过程.其变结构体现在:根据偏差 e 及其变化率 \dot{e} 的组合不同,控制作用将在两种模糊控制规则表之间切换.由于该算法可以利用控制器内部两个简单的模糊控制规则表的转换实现变时滞变参数非线性被控对象的高品质控制,无需硬件开关的不断切换,控制器的硬件软件简单可靠.

仿真和现场实验结果表明:聚焦式模糊变结构

控制算法比常规的PID控制和并联型模糊PID控制器具有更好的动态品质,可以有效地消除系统的稳态误差.该算法在广东某电厂2#机组锅炉的汽温控制系统中得到成功的应用,其控制效果良好,预示着聚焦式模糊变结构控制器具有很好的应用前景.

参考文献(References):

- [1] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338 – 353.
- [2] 胡一倩, 吕剑虹, 张铁军. 一类自适应模糊控制方法研究及在锅炉汽温控制中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(1): 136 – 140. (HU Yiqian, LU Jianhong, ZHANG Tiejun. A kind of adaptive fuzzy control method and its application to steam temperature control of the boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(1): 136 – 140.)
- [3] 左燕, 侯国莲, 张建华, 王田宏. 复合模糊串级系统在火电厂过热汽温控制中的应用[J]. *现代电力*, 2002, 19(1): 64 – 69. (ZUO Yan, HOU Guolian, ZHANG Jianhua, WANG Tianhong. Application of composite fuzzy serial control system to superheated steam temperature of thermal power station[J]. *Modern Electricpower*, 2002, 19(1): 64 – 69.)
- [4] 孙志英, 佟振声, 赵文升, 张聪师. 模糊自调整PID过热汽温控制系统[J]. *华北电力大学学报*, 2001, 28(4): 33 – 38. (SUN Zhiying, TONG Zhensheng, ZHAO Wensheng, ZHANG Congshi. Superheated steam temperature control system based on fuzzy

auto-tuning PID controller[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2001, 28(4): 33 – 38.)

- [5] 周晓兰, 田沛, 朱越添. 规则自调整模糊控制新算法及其在汽温控制中的应用[J]. *电力情报*, 2000, 3(3): 33 – 36. (ZHOU Xiaolan, TIAN Pei, ZHU Tianyue. A new algorithm of rule auto-adjusting fuzzy control and Its application to steam temperature control[J]. *Information on Electric Power*, 2000, 3(3): 33 – 36.)
- [6] 孙刘颖, 王春悦, 赵蓉. 数字通信原理与技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999. (LIU Ying, WANG Chunyue, ZHAO Rong. *Principle and Technology of Digital Communication*[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 1999.)
- [7] 陈来九. 热工自动调节原理和应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982: 324 – 327. (CHEN Laijiu. *The Theory and Application of The Automatic Regulation for Thermal Processes*[M]. Beijing: Water Resource and Electric Power Press, 1982: 324 – 327.)

作者简介:

杨 苹 (1967—), 女, 副教授, 博士, 主要研究领域为电力电子电路的建模与控制、现代控制理论及其应用, E-mail: eppyang@scut.edu.cn;

许礼尉 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为电力电子电路的建模与控制.

下 期 要 目

- 自主飞艇水平位移动力学建模及其控制 方存光, 王 伟, 王灵犀
- 一种基于监控理论的软件设计方法: 状态性质变换方法 王向云, 张文辉, 王 鹏, 李永超, 蔡开元
- 基于点线相合的机器人增量式地图构建 熊 蓉, 褚 健, 吴 俊
- 基于免疫算法的午饭时期层际高峰交通电梯群控制的动态优化 李中华, 谭洪舟, 张雨浓, 毛宗源
- 自校正信息融合Kalman平滑器 邓自立, 李春波
- Lipschitz广义非线性系统观测器设计 刘艳红, 李春文, 王玉振, 吴热冰, 楚 冰
- 具反映扩散有限连续分布时滞细胞神经网络的全局指数稳定性 罗毅平, 邓飞其, 汤志宏, 杨逢建
- 含正弦扰动奇异摄动时滞系统的最优减振控制 张宝琳, 唐功友
- 广义预测控制中Diophantine矩阵多项式方程的显式解 师五喜
- 含状态时滞及执行器饱和不确定系统反馈镇定及 L_2 增益分析 魏爱荣, 赵克友, 贾 磊
- 一类模糊时滞系统指定衰减度的鲁棒控制 邓长辉, 魏新江, 张慧凤
- 水平门限同积模型参数的拟极大似然估计 杨 政, 田 铮, 党怀义
- 不确定时延输出反馈网络化系统保性能控制 邱占芝, 张庆灵, 刘 明
- 船舶电站柴油机双脉冲 H_∞ 调速器的研究 黄曼磊, 王常虹
- 不确定多通道奇异大系统的分散鲁棒 H_∞ 控制 陈 宁, 桂卫华, Masao IKEDA