

Study of Tornado Pre-Heater Based on Fuzzy PID Composite Control

SUN Xianbo

School of Information Engineering, Hubei University for Nationalities, Enshi, China

Abstract: With the analysis of the difficulty to control a tornado pre-heater and the advantages as well as the disadvantages of common control methods, an efficient control model has been proposed for tornado pre-heater, namely, fuzzy PID composite control. Moreover, a detailed of algorithm design for fuzzy PID composite control has been offered in this paper by adopting Matlab to simulate and analyze the control system. The results of simulation give evidence to the reasonableness and advantages of fuzzy PID composite control strategy.

Keywords: tornado pre-heater; fuzzy PID; composite control; simulation

基于模糊 PID 复合控制的旋风预热器研究

孙先波

湖北民族学院信息工程学院, 恩施, 中国, 445000

摘要: 描述了旋风预热器控制难点, 分析了常见控制方法的优缺点, 设计了一种对旋风预热器有效地控制方式——模糊 PID 复合控制, 详细阐述了模糊 PID 复合控制的算法设计, 并用 Matlab 对控制系统进行了仿真分析。仿真结果证明了模糊 PID 复合控制策略的合理性和优越性。

关键词: 旋风预热器; 模糊 PID; 复合控制; 仿真

1 引言

在水泥生产过程中旋风预热器的工作过程属于复杂的热工反应过程, 是水泥生产的重要组成部分, 对生料的预热效果将直接影响到最后产品的质量的好坏、能耗的大小以及环保等众多方面。旋风预热器由于非线性, 时滞性, 机理复杂和检测困难等因素而难以建模, 用常规的控制方法难以奏效。然而, 富有经验的人员能够运用人特有的观察, 推理和学习能力, 通过直觉可以安全而有效地对这一类过程进行有效地控制。本文提出的模糊 PID 复合控制方法就是基于人类的这种有效方法来实现的。

虽然常用的 PID 控制器结构简单、使用方便、能满足大量工业过程的控制要求, 特别是其强鲁棒性能较好地适应过程工况的大范围变动, 但旋风预热器是一个大惯性, 大滞后, 时变和严重的非线性系统, PID 本质是线性控制, 难以解决非线性问题, 使用常规的 PID 控制器, 较难整定 PID 参数, 因而较难达到预期效果。模糊控制具有智能性, 属于非线性控制, 不需要装置的精确模型, 仅依赖于操作人员的经验和直观判断, 非常容易应用, 模糊控制具有一系列传统控制与之无法比拟的优点。这里采用模糊 PID 复合控制策

略, 即在一般 PID 控制系统基础上, 加上一个模糊控制规则环节。设计中将模糊控制和 PID 控制两者结合起来, 当温差较大时采用模糊控制, 当温差较小时采用 PID 控制, 使系统既具有模糊控制灵活、适应性强的优点, 又具有 PID 控制精度高的特点, 可获得较好的鲁棒性。鉴于 PID 控制方法在许多文献中有过介绍, 本文重点介绍模糊控制部分。

2 精确量的模糊化

模糊控制器的输入与输出语言变量是以自然语言形式, 而不是以数值形式给出的变量。在模糊控制器中总是确定误差(偏差)及其变化, 或(去掉)误差(偏差)及其和(去掉)变化量为输入语言变量, 确定被控过程的输入变量——控制量的变化为输出语言变量, 本文设计的模糊控制器中采用系统误差 e (水泥回转窑预热器五级筒出口实测温度与温度给定值之差) 及其误差变化率 ec 为输入语言变量, 以控制量(加热炉给定的煤量)的变化 u 为输出语言变量, 这种模糊控制器具有 PD 控制规律, 从而有利于保证系统的稳定性, 并可减少响应过程的超调量以及削弱其振荡现象, 系统框图如图 1 所示。

选定误差 e 的基本论域 $e=(-60^{\circ}\text{C}, +60^{\circ}\text{C})$, 模糊子集

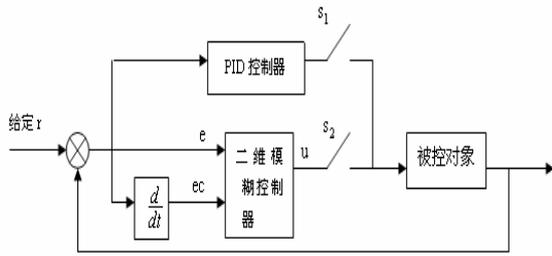


图 1. 二维模糊 PID 控制器系统框图

Figure 1. Two dimension fuzzy PID controller system diagram

的论域 $E=(-6,+6)$, 则量化因子 $K_e=0.1$ 。

选定误差变化率 ec 的基本论域 $ec=(-12^{\circ}C,+12^{\circ}C)$, 模糊子集论域 $EC=(-6,+6)$, 则量化因子 $K_{ec}=0.5$ 。

为语言变量选取较多的值, 规定控制规则时就比较灵活, 控制规则本身也比较细致, 但是, 相应地也使控制规则变得复杂, 制定起来也比较困难。因此, 每个语言变量宜选用 5—10 个值, 最常用的值 NB: 负大; NM 负中; NS: 负小; 0; PS: 正小; PM: 正中; PB: 正大, 7 个等级。

由于在实际的数据采集中不可能所采的数据得出的 e 和 ec 总是论域中的整数, 下面就求误差 E 的隶属函数值。按照工程经验, 把 E 的隶属属性和误差变化率 EC 在论域 $(-6,+6)$ 上的隶属函数定义如图 2, 3 所示。

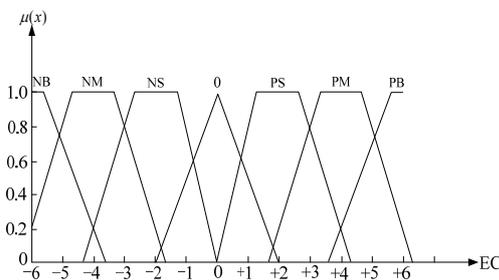


图 2. 误差 E 的隶属函数图

Figure 2. The subordination function diagram of E

根据如图 2, 图 3 所示的 E 和 EC 模糊取值的隶属函数, 可为输入语言变量 E 和 EC 分别建立如表 1, 表 2 所示。

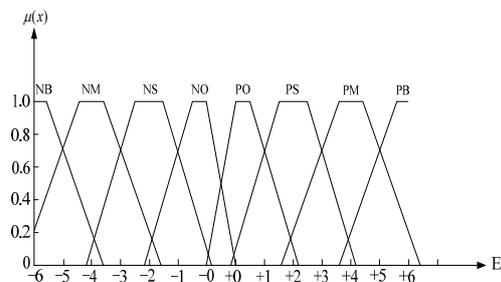


图 3. 误差变化率 EC 的隶属函数图

Figure 3. The subordination function diagram of EC

表 1. 输入语言变量 E 赋值表

Table 1. The assignment sheet of input variables E

$\begin{matrix} E \\ u(x) \\ I \end{matrix}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
PB												0.2	0.7	1
PM									0.2	0.7	1	0.7	0.2	
PS							0.1	0.7	1	0.7	0.1			
0					0.1	0.7	1	0.7	0.1					
NS			0.1	0.7	1	0.7								
NM	0.2	0.7	1	0.7	0.2									
NB	1	0.7	0.2											

表 2. 输入语言变量 EC 赋值表

Table 2. The assignment sheet of input variables EC

$\begin{matrix} EC \\ u(x) \\ I \end{matrix}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
PB												0.2	0.7	1
PM									0.2	0.8	1	0.8	0.2	
PS								0.8	1	0.8	0.2			
0						0.5	1	0.5						
NS			0.2	0.8	1	0.8								
NM	0.2	0.8	1	0.8	0.2									
NP	1	0.7	0.2											

输出变量 U 的隶属函数图如图 4 所示:

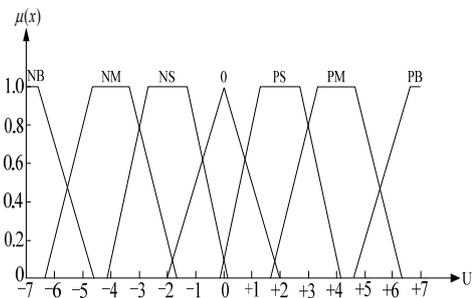


图 4. 输出变化量 U 的隶属函数图

Figure 4. The subordination function diagram of output variables U

再控制系统中, 模糊控制器的输入语言变量 E 和 EC 的量测值都是确定数, 但模糊控制器的输入要求为模糊集合, 因此, 必须把确定的数进行进行模糊化。

确定模糊化的方法, 首先根据确定数 e_1 即量化因子 k_e 由 $n_i = k_e \cdot e_1$ 求取 e_1 在基本论域 $[-e,+e]$ 上的量化等级 n_i ; 其次, 查找语言变量 E 的赋值表, 找出在元素 e_1 上与最大隶属度对应的语言所决定的模糊集合。该模糊集合便代表确定数 e_1 的模糊化。例如, 根据系统误差量测值 e_1 (确定数) 由 $k_e \cdot e_1$ 计算出 $n_i = +3$; 查语言变量 E 赋值表, 在 +3 级上的隶属度中间求取与最大者 0.7 对应的语言值 PM 的模糊集合 PM 为:

表 3. 模糊控制规则表
Table 3. Fuzzy rules sheet

	U	E							
EC									
NB	PB	PB	PM	PM	PM	O	O		
NM	PB	PB	PM	PM	PM	O	O		
NS	PB	PB	PM	PS	O	NM	NM		
O	PB	PB	PM	O	NM	NB	NB		
PS	PM	PM	O	NS	NM	NB	NB		
PM	O	O	NS	NM	NM	NB	NB		
PB	O	O	NS	NM	NM	NB	NB		

$$PM = \frac{0.2}{2} + \frac{0.7}{3} + \frac{1}{4} + \frac{0.7}{5} + \frac{0.2}{6}$$

$$= (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.2 \ 0.7 \ 1 \ 0.7 \ 0.2)$$

模糊集合 PM 便是确定数误差 e_1 的模糊化。

3 模糊控制算法设计

模糊控制算法，实质上是将操作者在控制过程中的实践经验（即手动控制策略）加以总结而得到的一条条模糊条件语句的集合。它是模糊控制器的核心。利用模糊集合理论和语言变量的概念，可以把用语言归纳的手动控制策略上升为数值运算。利用语言归纳手动控制策略的过程，实际上就是建立模糊控制规则的过程。

模糊控制器的规则是一组彼此间通过“或”的关系连接起来的模糊条件语句来描述的。如 *if E=NB and EC=NB then U=PB* 等，在本控制器中共用 $7 \times 7 = 49$ 条模糊条件语句。这 49 条模糊条件语句可表示成表 3 所示的模糊规则表。

选取控制量变化的原则是：以系统稳定性为主要出发点，当误差较大或者大时，选择控制量以尽快消除误差为主。而当误差较小时，选择控制量要注意防止系统超调。

上述每一条模糊条件语句，当输入、输出语言变量在各自论域上反映各语言值的模糊子集为已知时，都可以表达为论域的积集上的模糊关系 R 。根据表 3 所示，可求出总的模糊关系 R ，具体做法如下：根据模糊数学中的模糊条件推理，模糊条件语句“*if A and B then C*”所决定的三元模糊关系， R 的计算如下式：

$$R = (A \times B)^T \times C$$

其中， $(A \times B)^T$ 为模糊关系矩阵 $(A \times B)_{n \times m}$ 构成的 $n \times m$ 维列向量， n 和 m 分别为集合 A 和 B 的论域元素数。

本模糊控制器中，模糊控制状态表包含的每一条模糊条件语句都决定一个模糊关系，它们一共有 49 个，

计算的方法如下：

$$R_1 = \left[(NB)_E \times (NB)_{EC} \right]^T \times (PB)_U$$

$$R_2 = \left[(NM)_E \times (NB)_{EC} \right]^T \times (PB)_U$$

$$\vdots$$

$$R_{48} = \left[(PM)_E \times (PB)_{EC} \right]^T \times (NB)_U$$

$$R_{49} = \left[(PB)_E \times (PB)_{EC} \right]^T \times (NB)_U$$

下面以 R_2 为例来说明模糊关系的求法，由语言变量赋值表可得模糊集合 $(NM)_E$ 、 $(NB)_{EC}$ 、 $(PB)_U$ 向量如下：

$$(NM)_E : [0.2 \ 0.7 \ 1 \ 0.7 \ 0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$(NB)_{EC} : [1 \ 0.7 \ 0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$(PB)_U : [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.2 \ 0.7 \ 1]^T$$

$$\text{令： } D = (NM)_E \times (NB)_{EC}$$

$$= [0.2 \ 0.7 \ 1 \ 0.7 \ 0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\times [1 \ 0.7 \ 0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$= \begin{bmatrix} 0.2 & 0.14 & 0.04 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.49 & 0.14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.49 & 0.14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.04 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

将矩阵 D 写为 $13 \times 13 = 169$ 维列向量得到：

$$D = \left[\begin{matrix} 0.2 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & \dots & 0 & 0.14 & 0.49 & 0.7 & 0.49 & 0.14 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0.04 & 0.14 & 0.2 & 0.14 & 0.04 & 0 & \dots & 0 & \vdots \end{matrix} \right]^T$$

$$\text{模糊关系 } R_2 = D_1 \times (PB)_U$$

$$= D_1 \times [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.2 \ 0.7 \ 1]$$

按以上方法计算出每条模糊条件语句决定的模糊控制关系之后，可得到描述整个系统控制规则的总模糊关系 R 为：

$$R = R_1 \vee R_2 \vee \dots \vee R_{17} \vee R_{21} \vee \dots \vee R_{27} \vee \dots \vee R_{49}$$

于是，模糊控制算法的设计，在总结手动控制策略基础上，通过总模糊关系 \tilde{R} 的设计来实现。

4 输出信息的模糊判决

给定了模糊控制器的输入语言变量论域的模糊子集 \tilde{E} 和 \tilde{EC} ，计算出了控制规则包含的每一条模糊条件语句决定的模糊关系 $\tilde{R}_i (i=1,2,\dots,49)$ ，则其输出语言变量论域上的模糊子集 \tilde{U} 可计算为：

$$\begin{aligned} \tilde{U} &= (\tilde{E}_1 \times \tilde{EC}_1) \circ \tilde{R}_1 \vee (\tilde{E}_2 \times \tilde{EC}_1) \circ \tilde{R}_2 \\ &\vee \dots \vee (\tilde{E}_8 \times \tilde{EC}_1) \circ \tilde{R}_8 \vee (\tilde{E}_1 \times \tilde{EC}_2) \circ \tilde{R}_9 \vee \\ &(\tilde{E}_2 \times \tilde{EC}_2) \circ \tilde{R}_{10} \vee \dots \vee (\tilde{E}_7 \times \tilde{EC}_2) \\ &\circ \tilde{R}_{16} \vee \dots \vee (\tilde{E}_7 \times \tilde{EC}_7) \circ \tilde{R}_{49} \\ &= \tilde{U}_1 + \tilde{U}_2 + \tilde{U}_3 + \dots + \tilde{U}_{49} \end{aligned}$$

应用推理合成规则完成模糊推理的计算以后，就需要进行模糊判决。因为模糊控制器的输出是一个模糊集合，它反映控制语言的不同取值的一种组合。本控制器是针对水泥回转窑预热器出口气体进行控制，控制量是喂煤计量秤的下料量，系统只能接受一个控制量，这就需要从输出的模糊子集中判决出一个精确的控制量，也就是设计一个由模糊集合到普通集合的映射，这个映射称为判决。最后利用大隶属度法得到如表 4 所示的模糊控制器的查询表。在实际应用中利用采集的实际温度和温度变化率采用查表法即可得到相应的控制方法。

5 仿真结果及分析

采用 MATLAB 软件实现仿真，从 Simulink 界面

表 4. 模糊控制器查询表

Table 4. The query sheet of fuzzy controller

U		EC												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
E	-6	7	7	7	7	6	6	6	5	4	2	0	0	0
	-5	7	7	7	6	6	6	6	5	4	2	0	0	0
	-4	7	7	6	6	6	6	5	4	3	2	0	0	0
	-3	7	6	6	6	6	5	5	3	2	0	-1	-1	-1
	-2	5	5	4	4	4	3	2	1	0	0	-1	-1	-1
	-1	5	4	4	4	4	3	1	0	0	0	-3	-2	-1
	0	4	4	4	4	3	1	0	-1	-3	-4	-4	-4	-4
	1	2	2	2	2	0	0	1	-3	-4	-4	-4	-5	-5
	2	2	2	2	1	0	-2	3	-4	-4	-4	-5	-5	-5
	3	0	0	0	0	-3	-4	6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
	4	0	0	0	-2	-3	-4	6	-6	-6	-6	-7	-7	-7
5	0	0	0	-2	-4	-6	6	-6	-6	-6	-7	-7	-7	
6	0	0	0	-2	-4	-6	6	-6	-7	-7	-7	-7	-7	

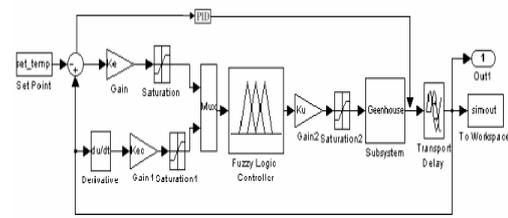


图 5. 模糊控制系统仿真模型
Figure 5. Fuzzy control system simulation model

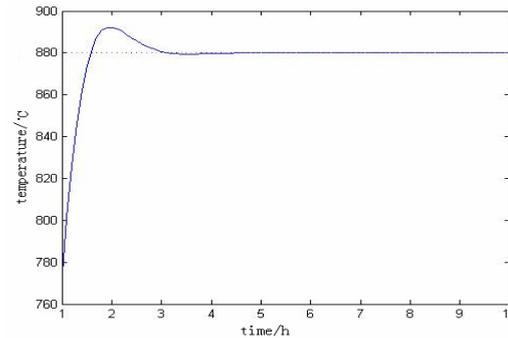


图 6. 仿真结果图
Figure 6. Result of simulation

中构造图形化控制系统模型，如图 5 所示。

从仿真结果看，温度控制曲线基本达到了设定温度的要求，体现了模糊 PID 复合控制在处理大惯性，大滞后，时变的非线性系统中的优越性和可靠性。

仿真结果如图 6 所示。

6 结论

采用模糊控制方法控制旋风预热器，能在多种干扰条件下有效地控制风机的转速，达到精确控制的目的。计算机仿真表明模糊控制旋风预热器性能良好。

References (参考文献)

- [1] Zhang weiguo, Yang xiangzhong. fuzzy control theory and application: Xi'an: Northwestern polytechnical university. 1999.10:1~11. 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论及应用. 西安: 西北工业大学, 1999.10:1-11.
- [2] Dou zhenzhong. Fuzzy logic control technology and application. Beijing: aerospace university publishing house. 2001 窦振中. 模糊逻辑控制技术及其在应用. 北京: 航空航天大学出版社, 2001.
- [3] Lei ting, Wu ritu, Zhao yingjie: information gathering and pressing system applied in cement kiln 2006.06:18-21 雷霆, 乌日图, 赵英杰. 应用于水泥窑的信息采集及处理系统, 水泥技术, 2006.06:18-21.
- [4] Shi huangxia, Xin xiaodong, Ma ruijun, Chen zhijiang; fuzzy control in cement rotary kiln application research science and technology information, 2006.04:36-39. 石黄霞, 信晓东, 马瑞军, 程志江. 模糊控制在水泥回转窑中应用的研究科技信息, 2006.04:36-39.
- [5] Gu xiaoqiang, Zhao laiding .fuzzy PID calculation applied in the vehicle-carried dynamic system. Xi'an: Xi'an posts and telecom-

munications institute journal.2007.01:38-40.

顾小强, 赵来定. 模糊 PID 算法在车载动力中系统的应用. 西安: 西安邮电学院学报, 2007.01:38-40.

- [6] Xue dingyu, Chen Yangquan. Systematic simulation technology and application based on Matlab and Simulink. [M]. Beijing: Qinghua university publishing house.2002.

薛定宇, 陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

- [7] Fischer Martin, Nelles Oliver, Isermann Rolf, Predictive control based on local linear fuzzy models[J]. Int J systems Science, 1998, 29(7):679-697.