

# 基于变论域模糊 PID 的汽提塔温度控制方法

高淑芝, 高宪文, 朱志承

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:** 针对汽提塔生产过程具有非线性、强耦合、大时滞及温度难以精确控制的问题, 设计了基于变论域模糊 PID 的汽提塔温度控制系统。选取了基于模糊规则的伸缩因子, 将变论域思想和模糊 PID 相结合, 形成变论域模糊 PID 控制系统结构。分别对常规 PID 算法、模糊 PID 算法及变论域模糊 PID 算法的汽提塔温度控制系统的仿真曲线进行对比, 仿真结果表明: 变论域模糊 PID 控制算法有更快的响应速度、更小的超调量和更好的跟踪性能。

**关键词:** 汽提塔; 变论域; 伸缩因子; 模糊 PID; 仿真

中图分类号: TP 273 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2010)10-1369-04

## Stripper Temperature Control Method Based on Variable Universe Fuzzy-PID

GAO Shu-zhi, GAO Xian-wen, ZHU Zhi-cheng

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China.  
Correspondent: GAO Xian-wen, E-mail: gaoxianwen@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** The stripping process in a stripper is characterized by high nonlinearity, large time delay, strong coupling and that the temperature is difficult to control accurately. A stripper temperature control system based on the variable universe fuzzy-PID was therefore designed. With the scale factor chosen according to fuzzy rules and the concept of variable universe combined with fuzzy-PID, a variable universe fuzzy-PID control system was formed. Then, the three simulation curves of conventional PID algorithm, fuzzy-PID algorithm and variable universe fuzzy-PID algorithm of the stripper temperature control system were compared with each other, and the results showed that the variable universe fuzzy-PID control algorithm has a shorter response time, smaller overshoot and better tracking performance.

**Key words:** stripper; variable universe; scale factor; fuzzy-PID; simulation

聚氯乙烯树脂是通用塑料品种, 它是由氯乙烯单体聚合生成聚氯乙烯<sup>[1]</sup>。由于氯乙烯单体具有一定的毒性, 因此聚氯乙烯树脂产品中残留氯乙烯含量必须控制在一定范围内。脱除聚氯乙烯中的氯乙烯单体一般采用汽提工艺, 它具有高度非线性、时变及强耦合等特点, 是典型的复杂工业过程。运用传统的控制方法难以达到高精度的控制效果。因此, 对汽提过程采用先进控制技术, 可以提高聚氯乙烯产品质量, 降低生产成本和保护环境<sup>[2-3]</sup>。

本文根据聚氯乙烯汽提塔温度难以精确控制的特点, 设计了变论域模糊 PID 的汽提塔温度控

制系统<sup>[4-5]</sup>。变论域模糊 PID 控制的效果优于常规模糊 PID 控制, 它提高了系统的动态特性和控制精度, 有效地克服稳态误差和颤振现象。

### 1 模糊控制算法的论域伸缩

李洪兴首先提出了变论域的思想: 在规则形式不变的前提下, 论域随着误差变小而伸缩。局部地考虑, 论域伸缩相当于增加规则, 从而提高了控制精度<sup>[6-7]</sup>。在变论域思想提出后一些对其改进的设计方法也不断被提出<sup>[8-11]</sup>。

图 1 为初始论域及其模糊划分。设  $e$  的初始论域为  $[-E, E]$ ,  $E$  为实数, 采用 7 个规则, 把

$[-E, E]$  做出如图 1 所示划分。随着控制的进行, 误差向零位(ZE) 靠近, 即误差缩小, 显然论域  $[-E, E]$  相对于缩小后的误差偏大。继续进行模糊推理, 其控制精度将受到影响。论域收缩方法就是在规则形式不变的前提下, 论域随着误差变小而伸缩。在图 2 中, 考虑了输入变量误差  $e$  的论域变化过程。初始论域  $[-E, E]$  通过“伸缩”因子  $\alpha(x)$  变换为  $[-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$ , 其中的  $\alpha(x)$  为误差变化量  $x$  的连续函数:  $\alpha: [-E, E] \rightarrow [0, 1], x \mapsto \alpha(x)$ 。

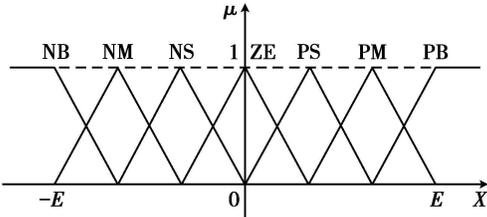


图 1 初始论域及其模糊划分

Fig. 1 Initial universe and fuzzy partition

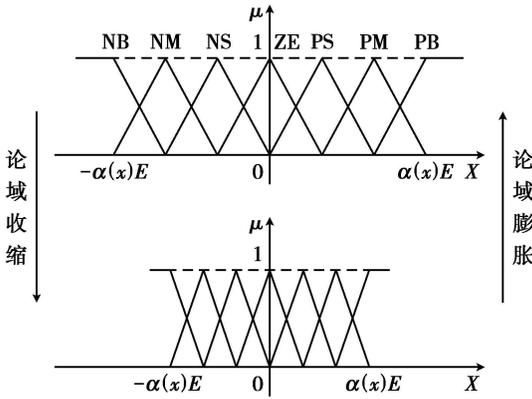


图 2 论域的伸缩与膨胀

Fig. 2 Universe shrinking and expanding

其中, B, M, S, Z 表示论域“扩大或缩小的程度”。对于输出论域伸缩因子  $\beta$  的取值, 应由  $e$  和  $e_c$  共同决定, 即根据  $e$  和  $e_c$  当前取值所反映的系统响应状态来确定输出论域改进多大程度的扩大或者缩小。当  $e$  和  $e_c$  很大, 且两者符号相同时, 表明系统与设定值之间的差距很大, 且系统正以很快的速度偏离设定值, 这将使误差进一步扩大, 此时应有较大的控制量将系统调节回来, 使系统尽快跟踪设定值。因此  $\beta$  应取大些以使输出论域扩大。上述规律用规则表示如下:

如果  $e$  是 PB 且  $e_c$  是 PB, 则  $\beta$  为 VB;

如果  $e$  是 NB 且  $e_c$  是 NB, 则  $\beta$  为 VB。

当  $e$  和  $e_c$  很大, 但两者符号相反时, 表明系统与设定值之间的差距很大, 但系统正以很快的速度靠近设定值, 此时的控制量可以保持适当值, 使系统既快速跟踪设定值又不产生较大的振荡。因此,  $\beta$  应取小些以使输出论域有较小幅度的压缩。上述规律用规则表示如下:

如果  $e$  是 PB 且  $e_c$  是 NB, 则  $\beta$  为 Z;

如果  $e$  是 NB 且  $e_c$  是 PB, 则  $\beta$  为 Z。

当  $e$  接近零而  $e_c$  很大时, 表明系统与设定值之间的差距非常小, 但系统正以很快的速度偏离设定值, 此时控制量应较大以抑制系统偏离设定值的趋向。因此,  $\beta$  应取较大的值以使输出论域有所扩大。上述规律用规则表示如下:

如果  $e$  是 Z 且  $e_c$  是 NB, 则  $\beta$  为 B;

如果  $e$  是 Z 且  $e_c$  是 PB, 则  $\beta$  为 B。

类似地可以推导出  $e$  和  $e_c$  在各类情况下  $\beta$  的对应语言变量值。基于模糊规则的输出论域伸缩因子规则如表 2 所示。

## 2 基于模糊规则的伸缩因子选取

变论域模糊控制器的关键在于怎样确定论域伸缩的合理机制, 即确定适当的伸缩因子, 使最终的控制效果能够最大限度满足要求<sup>[12]</sup>。

基于模糊控制规则的伸缩因子是选择易于表达的语言来描述。其基本思想如下: 当输入变量  $e$  和  $e_c$  大时, 其论域保持不变; 当输入变量小时, 将其论域缩小, 定义在论域上的模糊划分也随之压缩, 使输入变量可用规则增多, 这就消除了模糊规则数量与控制精度的矛盾, 增加了控制灵敏度。设输入变量  $e$  和  $e_c$  的伸缩因子分别为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ , 则基于模糊规则的输入论域伸缩因子规则如表 1 所示。

表 1 输入论域伸缩因子规则

Table 1 Input rules of universe scale factor

$e/e_c$	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
$\alpha_1/\alpha_2$	B	M	S	Z	S	S	N

表 2 输出论域伸缩因子规则

Table 2 Output rules of universe scale factor

$e_c$	$e$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VB	VB	VB	B	SB	S	Z
NM	VB	VB	B	B	MB	S	VS
NS	VB	MB	B	VB	VS	S	VS
Z	S	MB	B	VB	VS	S	VS
PS	VS	S	VS	VB	B	MB	VB
PM	VS	S	MB	B	B	VB	VB
PB	Z	S	SB	B	VB	VB	VB

## 3 变论域模糊 PID 温度控制系统

在变论域模糊 PID 温度控制系统中, 其控制器系统的结构如图 3 所示。系统共分上中下三层, 上层为伸缩因子调整单元, 利用汽提塔温度误差  $e$  和汽提塔温度误差变化率  $e_c$  作为伸缩因子调整

单元的输入, 经过模糊推理得到论域  $E$  和  $E_c$  的伸缩因子  $\alpha_1(t)$ ,  $\alpha_2(t)$ , 而输出论域伸缩因子为  $\beta(t)$ ; 中层为变论域模糊控制单元, 经模糊推理得到的输出变量为 PID 控制参数的定量  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$ , 再由加法运算器加上初始值, 就得到优化后的 PID 控制参数  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ; 下层为 PID 控制单元, 其输出的控制量驱动执行机构对汽提塔进行温度控制。

汽提塔温度的波动  $e$  在  $(-7 \sim 7)^\circ\text{C}$  内, 汽提塔温度变化率的基本论域为  $(-2 \sim 2)^\circ\text{C/h}$ , 将  $e$  和  $e_c$  模糊语言变量量化到整数论域  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  所取的模糊子集的论域为  $\{-0.06, -0.05, -0.04, -0.03, -0.02, -0.01, 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06\}$ 。

根据上述各量引入伸缩因子  $\alpha_1(t)$ ,  $\alpha_2(t)$ , 即输入  $e$  的论域为  $\alpha_1(t) E = [-7\alpha_1(t), 7\alpha_1(t)]$ ;  $e_c$  的论域为  $\alpha_2(t) E_c = [-7\alpha_2(t), 7\alpha_2(t)]$ 。

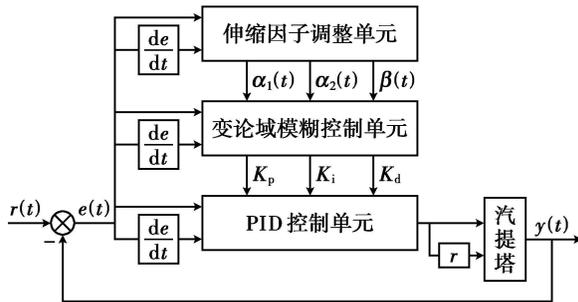


图 3 汽提塔控制系统结构图

Fig. 3 Architecture of stripper control system

### 4 仿真研究

在常规 PID 控制器的设计中, 关键的问题是 PID 参数的整定。传统的 PID 控制器参数采用实验加试凑的方法由人工整定。根据前面所设定的汽提塔仿真模型及条件, 分别对变论域模糊 PID、模糊 PID 算法和常规 PID 算法控制下的仿真曲线加以比较。在汽提塔运行的过程中, 外界干扰会使系统的设定值和滞后时间发生改变, 因此文中分别对有外界干扰、温度设定值突然改变影响汽提塔的稳定性的进行了仿真比较。

根据聚氯乙烯汽提塔对象特点, 在所设计的 3 种控制器中, 常规 PID 控制器的参数整定为  $K_p = 0.15$ ,  $K_i = 0.04$ ,  $K_d = 0.08$ ; 模糊 PID 控制器初始参数为  $K_{p0} = 0.4$ ,  $K_{i0} = 0.1$ ,  $K_{d0} = 0.15$ ; 变论域模糊 PID 控制器参数选取为:  $K_{p0} = 0.3$ ,  $K_{i0} = 0.65$ ,  $K_{d0} = 0.25$ 。PID 算法、模糊 PID 算法和变

论域模糊 PID 算法控制下的仿真曲线比较如图 4 所示。

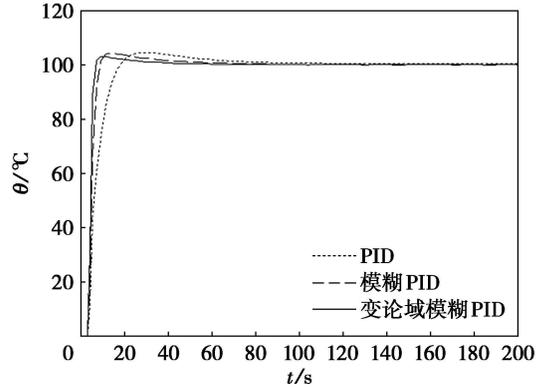


图 4 3 种不同控制方法的响应曲线比较

Fig. 4 Comparison between response curves of three different control methods

图 5 是汽提塔控制过程中在 80 s 时刻加入幅值为 4 的干扰时 3 种控制响应曲线的比较。

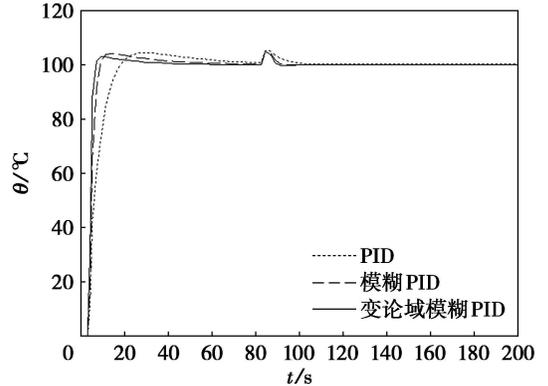


图 5 幅值为 4 扰动下的响应曲线比较

Fig. 5 Comparison between response curves when disturbance value is 4

图 6 是汽提塔在整个控制过程中人为地加入了幅值为 3 的随机干扰信号时 3 种控制响应曲线的比较。

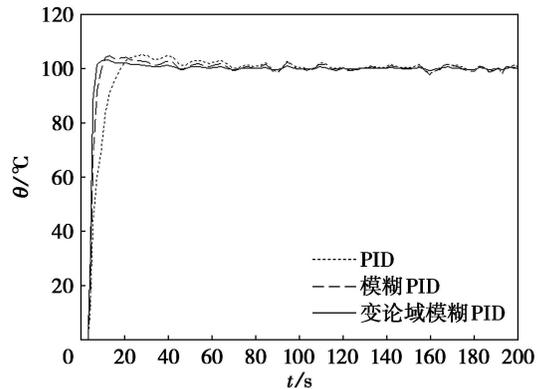


图 6 随机扰动下的响应曲线比较

Fig. 6 Comparison between response curves with random disturbance

为了模拟实际生产情况, 在第 90 s 以后使汽提塔温度的设定值由  $100^\circ\text{C}$  升高到  $105^\circ\text{C}$  时 3 种

控制响应曲线的比较见图 7。

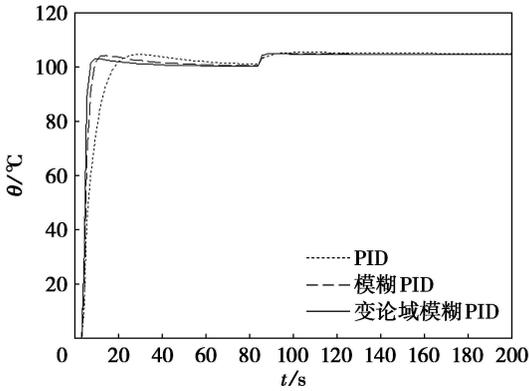


图 7 温度设定值变化时的响应曲线比较

Fig. 7 Comparison between response curves when temperature setting point changes

## 5 结 论

针对汽提塔温度难以精确控制的问题, 本文提出了一种利用模糊规则调整伸缩因子的变论域模糊 PID 控制方法。分别对常规 PID 算法、模糊 PID 算法及变论域模糊 PID 算法的汽提塔温度控制系统的仿真曲线进行对比。仿真结果表明: 变论域模糊 PID 控制算法有更快的响应速度、更小的超调量和更好的跟踪性能, 实现了系统的无差控制, 减弱了被控对象的滞后性对系统的影响。

### 参考文献:

[ 1 ] 惠正纲. 汽提技术在 PVC 生产中的应用 [ J ]. 聚氯乙烯, 2007, 7(2): 8- 12.  
(Hui Zheng-gang. The application of stripping technology in the production of PVC [ J ]. *Polyvinyl Chloride*, 2007, 7(2): 8- 12.)

[ 2 ] Azeem M F, Ahmad N, Hanmandlu M. Fuzzy modeling of fluidized catalytic cracking unit [ J ]. *Applied Soft Computing*, 2007, 7(1): 298- 324.

[ 3 ] Chang H, Hou W C. Optimization of membrane gas separation systems using genetic algorithm [ J ]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(16): 5355- 5368.

[ 4 ] Ni J Y, Luo J, Chen Z P, et al. Variable universe adaptive fuzzy control for liquid level [ C ] // *Computational Intelligence and Design*. ISCID, 2008: 158- 161.

[ 5 ] Wu C J, Ku C N, Fu Y Y, et al. A genetic-based design of auto-tuning fuzzy PID controllers [ J ]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2009, 11(1): 49- 58.

[ 6 ] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器 [ J ]. 中国科学, 1999, 5(1): 32- 42.  
(Li Hong-xin. Variable universe adaptive fuzzy controller [ J ]. *Science of China*, 1999, 5(1): 32- 42.)

[ 7 ] 裘智峰, 黄灯. 基于变论域插值模糊 PID 控制系统的研究与应用 [ J ]. 仪器仪表学报, 2008, 3(29): 2435- 2440.  
(Qiu Zhifeng, Huang Deng. Research and application of fuzzy PID control system based on variable universe [ J ]. *Journal of Scientific Instrument*, 2008, 3(29): 2435- 2440.)

[ 8 ] Wang J, Zhang Z, Li H Y. Synchronization of Fitzhugh-Nagumo systems in EES via H-infinity variable universe adaptive fuzzy control [ J ]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2008, 36(5): 1332- 1339.

[ 9 ] Shan W W, Ma Y, Newcomb R W, et al. Analog circuit implementation of a variable universe adaptive fuzzy logic controller [ J ]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* Express Briefs, 2008, 55(10): 976- 980.

[ 10 ] Li H X, Miao Z H, Lee E S. Variable universe stable adaptive fuzzy control of a nonlinear system [ J ]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2002, 44(5/6): 799- 815.

[ 11 ] Duan X G, Li H X, Deng H. Effective tuning method for fuzzy PID with internal model control [ J ]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(21): 8317- 8323.

[ 12 ] 朱岩, 郭军平. 变论域自适应模糊 PID 方法的研究与仿真 [ J ]. 空军工程大学学报, 2005, 6(5): 12- 13.  
(Zhu Yan, Guo Jing-ping. Research and simulation of self-adaptive fuzzy PID method based on variable universe [ J ]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2005, 6(5): 12- 13.)