

DOI: 10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.1.12

基于模糊自整定 PID 和 Smith 预估相结合的 分子蒸馏真空度控制

霍德华, 尤文*, 李晓朋, 田鑫宇

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 由分子蒸馏动态过程特性以及对蒸馏真空度的要求, 将真空度视为纯滞后温度控制对象, 将模糊自整定 PID 与 Smith 预估相结合, 实现了 PID 参数的自调节, 解决了分子蒸馏真空度控制系统中的“非线性”和“时滞”问题。

关键词: 分子蒸馏; Smith 估计; 模糊控制; 真空度

中图分类号: TQ 028.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)01-0068-05

Vacuum degree control of molecular distillation based on fuzzy self-tuning PID and Smith prediction

HUO Dehua, YOU Wen*, LI Xiaopeng, TIAN Xinyu

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Considering the dynamic process of molecular distillation and the required distillation vacuum degree, we take the vacuum parameter as a time-delay control object and combine the fuzzy self-tuning PID with Smith estimation to realize the self-adjustment of PID parameters and solve the problems such as nonlinearity and time-lag.

Key words: distillation; Smith estimation; fuzzy control; vacuum degree.

0 引言

分子蒸馏是根据分子自由平均行程的差别, 在惰性气体或高真空条件进行的一种液-液分离技术^[1]。蒸馏温度低、分离时间短、分离效率高、能耗低等是分子蒸馏的典型特点, 因此, 广泛应用

于高沸点、热稳定性差的有机混合物中。在分子蒸馏的动态过程中, 蒸馏的真空度是非常重要的操作参数, 如何使真空度在最短的时间内达到要求的数值, 是保证分子蒸馏效率和产品质量的关键^[2]。分子蒸馏过程的真空度变化具有滞后特性, 而在目前的工业生产中, 大多采用的是传统的

收稿日期: 2017-08-07

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20130206074SF)

作者简介: 霍德华(1993-), 女, 汉族, 吉林通化人, 长春工业大学硕士研究生, 主要从事生产过程检测与智能控制方向研究, E-mail: huodehua0313@163.com. * 通讯作者: 尤文(1961-), 男, 汉族, 吉林长春人, 长春工业大学教授, 博士, 主要从事生产过程检测与智能控制方向研究, E-mail: youwen@ccut.edu.cn.

PID 控制,但是会出现超调较大、稳定性差、调节时间长等问题,相比于传统的 PID、Smith 预估控制的模糊 PID 控制方法有较为出色的控制效果。

1 分子蒸馏真空度模型的建立

分子蒸馏的过程是一个复杂多变量、强耦合的非线性系统。其实质是在高度真空的环境下,依靠不同物质分子运动平均自由程的差别实现混合物的分离,从而产生一定要求的纯化物。其蒸发器中的真空度、蒸馏温度、液膜的厚度、液膜的浓度等变量直接影响产品的得率和纯度^[3]。

文中蒸馏过程的模型将真空阀开度作为控制器的输出,即蒸馏模型的输入量,将真空度作为对象的输出,用工业实际采样数据建立对象的传递函数。

1.1 模型结构的选择

待辨识对象的输入量是 $u(s)$,即蒸馏系统中的阀门开度,待辨识对象的输出量为 $Y(s)$,即蒸馏系统中压力的响应值,系统的初始平衡点为 $Y(0)$,即蒸馏系统中压力的初值,要求解的对象 $u(s)$ 和 $Y(s)$ 关系的传递函数为 G ,表示为

$$Y(s) = Gu(s) + Y(0) \tag{1}$$

$$G = \frac{K}{(Ts + 1)^n} e^{-\tau s} \tag{2}$$

初始状态下,将 $u(s)$ 施加幅值是 U 的阶跃激励信号,则有系统的稳态输出:

$$Y(\infty) = K(U - 0) + Y(0) \tag{3}$$

系统的响应为:

$$Y(s) = G \frac{U - 0}{s} + Y(0) \tag{4}$$

$$\frac{G}{s} = \frac{Y(s) - Y(0)}{U} \tag{5}$$

根据式(3),能够利用输出增益 $Y(\infty) - Y(0)$

除以 U ,计算出 K 值。 K 值可利用在阶跃响应下系统稳定后的数据来充分逼近,不仅能够保证 K 的准确度,同时降低模型辨识的难度^[4]。

为方便计算,对输出相应归一化处理得到:

$$Y^* = \frac{Y(s) - Y(0)}{Y(\infty) - Y(0)} \tag{6}$$

由式(2)、式(3)、式(5)可推出

$$Y^*(s) = \frac{1}{s(Ts + 1)^n} e^{-\tau s} \tag{7}$$

式中: $Y^*(s)$ ——归一化后系统输出待辨识对象。

1.2 模型的辨识

采用 SOPDT 来确定传递函数

$$G = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s}$$

中的未知参数 K, T_1, T_2, τ ^[5]。给定幅值为 240° 的阀口开度阶跃信号,即真空机组的抽气速率为额定的 70%,监测并记录蒸发器内压力的变化数据,采样时长 5 min,采样周期 5 s^[6]。

可得

$$K = 98, T_1 = 7, T_2 = 6, \tau = 12$$

因此,阀口开度与蒸发器中真空度的关系传递函数为:

$$G = \frac{98}{(7s + 1)(6s + 1)} e^{-12s}$$

2 模糊 PID 控制器的设计

2.1 模糊 PID 控制原理

将期望值与实际值的偏差 e 和偏差随时间的变化率 e_c 作为模糊控制器的输入,通过模糊化、模糊推理、去模糊化等操作处理,可以输出 K_p, K_i, K_d 对应的调整值,记作 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。模糊自整定 PID 控制系统的设计框图如图 1 所示。

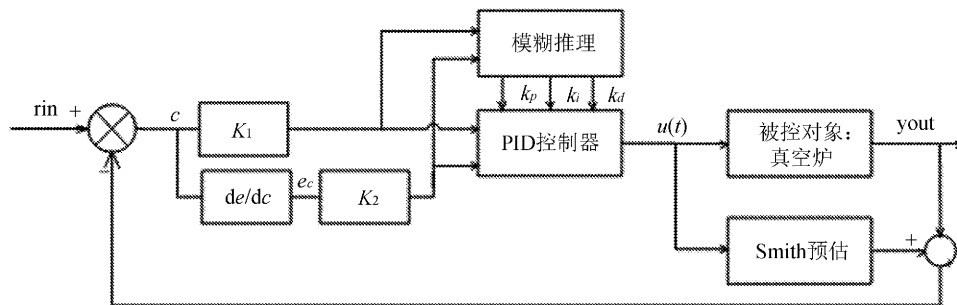


图 1 真空度控制结构图

2.2 模糊控制规则

将误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入变量,且为钟型隶属函数。 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为输出,它们的隶属函数由三角函数(Trimf)构成。依靠生

产过程中的实际数据的总结及操作经验,建立合适的模糊规则表,得到模糊推理值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 这 3 个自整定参数的模糊控制规则见表 1、表 2 和表 3。

表 1 ΔK_p 的模糊推理规则表

ΔK_p		e_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
	NS	PM	PM	PM	PM	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	N
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 的模糊推理规则表

ΔK_i		e_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_d 的模糊推理规则表

ΔK_d		e_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

设其模糊子集为: e 、 e_c 、 K_p 、 K_i 、 K_d 均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 且其都服从

正态分布^[7]。由此得到输入及输出量的语言变量、基本论域、模糊子集、模糊论域及量化因子,见

表 4。

表 4 语言变量、基本论域、模糊子集、模糊论域和量化因子

变量	e	e_c	k_p	k_i	k_d
语言变量	E	ED	K_p	K_i	K_d
基本论域	$[-205 \ 205]$	$[0.9 \ 0.9]$	$[-3 \ 3]$	$[-3 \ 3]$	$[-3 \ 3]$
模糊子集	$\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$				
模糊论域	$[-3 \ 3]$	$[-3 \ 3]$	$[-3 \ 3]$	$[-3 \ 3]$	$[-3 \ 3]$
量化因子	$3/205=0.014 \ 6$	$3/0.9=3.333$	1	1	1

3 Smith 预估控制

Smith 补偿控制是一种预估控制方法, 主要解决时滞系统控制问题。其工作原理是先估计出过程在基本扰动下的动态特性, 然后由预估器进

行补偿, 力图使被延迟了 τ 的被测量超前反映到调节器, 使调节器提前动作, 从而明显地减小超调量和加速调节过程。其预估控制结构原理如图 2 所示。

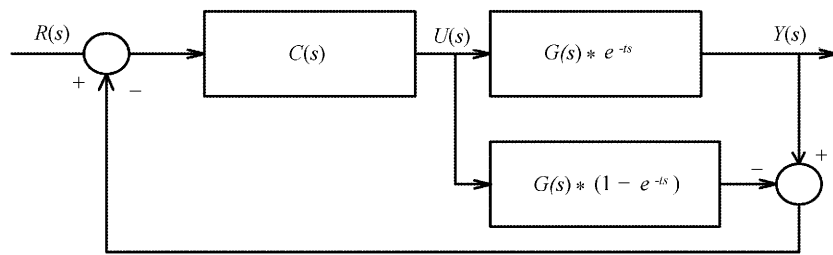


图 2 Smith 预估控制结构原理图

4 仿真试验研究

用试凑法得到传统 PID 的参数, 作为原始的

K_p, K_i, K_d 的值^[8], $K_p = 2.5, K_i = 0.007, K_d = 10$ 。搭建的 Simulink 仿真图如图 3 所示。

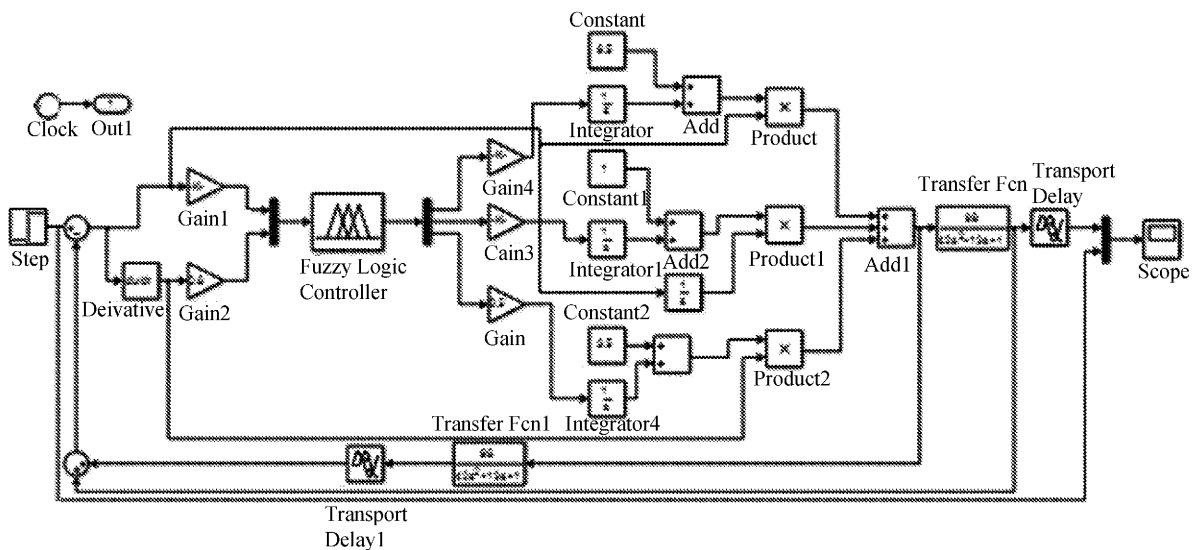


图 3 Simulink 构建的 Smith 补偿模糊 PID 结构图

加入 Smith 补偿的模糊 PID 控制的真空度变化曲线如图 4 所示。

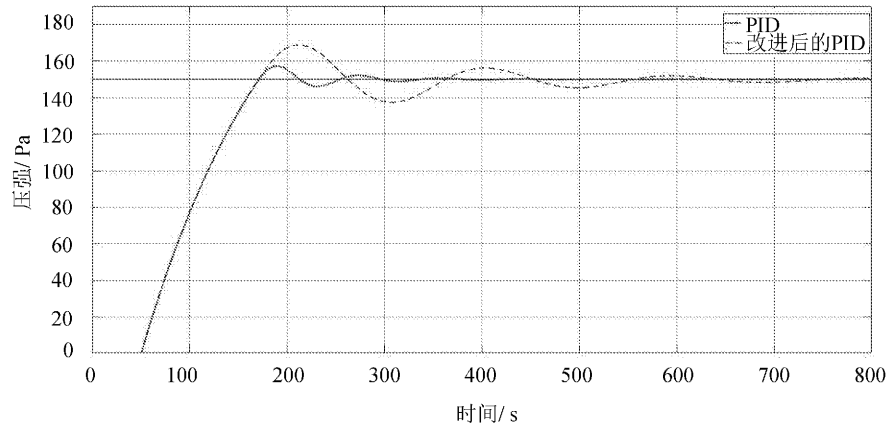


图 4 加入 Smith 补偿的模糊 PID 控制的真空度变化曲线

根据 Smith 预估模糊 PID 控制所得结果与传统 PID 相比较^[9]。可发现改进后的模糊 PID 超调较小,调节时间短,系统的鲁棒性较好。

5 结 语

改进后的模糊 PID 控制有更小的超调,能够更快地达到稳态,使真空度稳定控制在 150 Pa,降低蒸馏过程中能量的消耗。对真空度进行连续控制,不仅能够有效解决高真空下密封变形的补偿问题,还能够保证设备在高真空下能长期稳定运行。控制真空度稳定在固定范围,一方面提高了设备的操作弹性,另一方面避免了因压力波动对设备正常操作性能的干扰。

参考文献:

[1] Hang Zhijun, Ying Anguo, Wu Hao. The progress of molecular distillation technology application and research in the pharmaceutical industry[J]. Chemical Production and Technology, 2012, 19(2): 37-40.

[2] 史文树. 热泵蒸馏的节能技术与应用[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2010, 31(5): 523-527.

[3] 李慧. 刮膜式分子蒸馏传质模型及其仿真[J]. 化工学报, 2015(3): 2-3.

[4] 王景成. 一类不确定时滞系统的鲁棒控制器设计[J]. 自动化学报, 1998, 24(3): 345-349.

[5] 王文渊, 韩立路, 唐守勇, 等. 分子蒸馏提纯柠檬烯的理论模型研究[J]. 天然产物研究与开发, 2012(11): 1517-1521.

[6] Ding F, Liu X P, Liu G. Multi innovation least squares identification and applications[J]. Inequal Appl, 2000, 28: 533-536.

[7] 杨世勇, 徐国林. 模糊控制与 PID 控制的对比及其复合控制[J]. 自动化技术与应用, 2011(11): 3-5.

[8] 袁凤莲. Fuzzy 自整定 PID 控制器设计及其 Matlab 仿真[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2006, 23(1): 71-73.

[9] 连锦花, 孙果宋. 分子蒸馏技术及其应用[J]. 化工技术与开发, 2010, 39(7): 32-38.