

# ACR 聚合反应釜的建模与控制方法研究

周 笋, 吉国力\*

(厦门大学自动化系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 由于乳液聚合过程非常复杂, 聚合釜的建模是聚合反应工程中的一个难点. 本文分析了乳液聚合反应机理上的定性的特点, 结合聚合速率随转化率变化的统计规律, 建立起丙烯酸酯共聚物树脂 (ACR) 聚合釜温度变化的数学模型, 其特点是非线性、参数时变且带有纯滞后. 针对这样的控制对象, 结合 Smith 预估控制和模糊控制原理, 设计出一种史密斯模糊控制方法, 给出了控制规则表、比例因子等的调整方法以改善系统的动态性能, 进行了系统参数固定和参数时变两种情况下的仿真实验. 与传统的 Smith-PID 控制进行比较, 证明 Smith-fuzzy 控制达到了理想的控制效果并具有较强的抗干扰能力.

**关键词:** 聚合反应釜; Smith-fuzzy 控制; 仿真

**中图分类号:** TP 273.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2006)04-0475-05

丙烯酸酯共聚物树脂 (Acrylate Copolymer Resin, ACR) 是一种综合性能优良的 PVC 抗冲改性剂, 其生产的核心设备是乳液聚合反应釜. 聚合反应是较强的放热反应, 反应放热与散热调节的矛盾十分突出, 如不能施加良好的控制, 很容易引起暴聚或反应终止. 反应釜对于温度控制的要求很高, 这直接关系到产品的质量以及反应的安全性.

在关于聚合反应釜系统的控制方法研究文献<sup>[1]</sup>中, 大多不是针对实际的被控对象模型, 而是基于一个假设的模型 (多为一阶惯性环节加纯滞后). 这是由于乳液聚合过程非常复杂, 聚合的机理尚在研究中. 由于涉及聚合反应动力学与热力学等多方面的困难, 关于如何建立乳液聚合釜的数学模型, 目前还没有现成方法可循. 本文以厦门电化厂的引进 ACR 生产装置为研究对象, 经大量调研与实验研究, 建立聚合釜温度变化过程的数学模型, 再根据该实际模型进一步对温度控制算法进行研究.

## 1 ACR 聚合反应釜的建模

聚合反应釜是通过调节冷却水/蒸汽夹套的流量来对聚合釜进行散热或传热. 我们对乳液聚合过程的 3 个阶段分别都建立了数学模型<sup>[2]</sup>, 本文以主要阶段——匀速聚合阶段为例, 给出建模过程并研究其温度控制算法.

### 1.1 乳液聚合反应的主要特点

(a) 从聚合反应动力学的角度看, 乳液聚合存在着 3 个阶段, 即乳胶粒生成阶段、匀速聚合阶段、降速阶段. 其中匀速聚合阶段对应转化率从约 15% 到 50%~80% 的过程, 是主要阶段.

(b) 由于非均相的 ACR 聚合反应是在乳胶粒中进行的, 物质浓度参数应该是物质在乳胶粒中的浓度, 而不是在液体中的浓度.

(c) 夹套冷却水/蒸汽与釜内液体之间的传热通过间壁进行, 因此必须考虑间壁对传热动态特性的影响, 模型应是一个双容过程.

(d) 生产过程中物料 (如冷却水、蒸汽等) 的输送有一定的距离, 需要一定时间之后才能将釜内液体的热量带走; 并且, 反应釜内传热流型复杂, 釜内液体产生的热量也需经一定时间才能传到釜-夹套间壁, 再由间壁传出去. 因此系统具有纯滞后的特征.

### 1.2 问题假设与简化

乳液聚合过程非常复杂, 为了用简明的形式反映对象的主要特点, 建模时需要进行一些合理的假设和必要的简化, 忽略一些次要因素, 主要包括: (a) 聚合过程中自动加速现象的简化; (b) 将反应釜视为间歇反应器; (c) 忽略引发反应所消耗的单体; (d) 拟稳态假设, 即将液体比热容、密度等参数视为恒定; (e) 假设反应釜内的液体流动为理想混合流; (f) 将多种单体等效为一种单体来计算体积质量、聚合热等参数, 将分子量不同的反应物等效为一种齐聚物.

### 1.3 建立数学模型

从乳胶粒生成阶段末直到单液滴消失为止为匀

收稿日期: 2006-01-30

基金项目: 福建省重点科技项目 (2001 H020) 资助

作者简介: 周笋 (1974-), 女, 硕士.

\* 通讯作者: gjj @xmu.edu.cn

速聚合阶段.随着聚合物粒子的长大,单体液滴缩小.当转化率  $x$  达 50% ~ 80% 时,单体液滴消失,所有单体都在聚合物粒子中进行聚合.从统计学的角度,根据大量实验测得的数据,如聚合率 - 时间曲线、平均聚合度 - 转化率曲线、转化率 - 时间关系曲线等,得到了聚合速率随转化率变化的规律,这就是,聚合反应进行到某转化率为止时是按零级反应进行的,单体液滴消失后则是按一级反应进行<sup>[3]</sup>.建立方程如下:

(a) 聚合速率方程 由于匀速聚合阶段是零级反应,反应速率与浓度无关,结合阿累尼乌斯公式,可得

$$r_p = \frac{k_p [M]_p n N}{N_A} = \frac{K_0 N}{2 N_A} [M]_p e^{-E/R} \quad (1)$$

(b) 换热器间壁热量平衡方程 如图 1,由能量平衡关系可知,间壁在单位时间内蓄存的热量 = 釜在单位时间内带来的热量 - 冷却水在单位时间内带走的热量,即

$$m_M C_{pM} \dot{M} = KA (\dot{M} - M) - W_{CWS} (h_{CWR} - h_{CWS}) \quad (2)$$

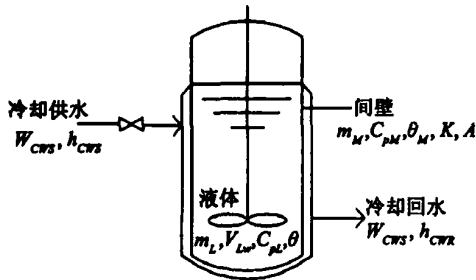


图 1 ACR 聚合反应釜热量平衡示意图  
Fig. 1 Heat balance diagram of ACR polyreactor

(c) 釜内液体热量平衡方程 釜内在单位时间内蓄存的热量 = 反应在单位时间内放出的热量 - 间壁在单位时间内移去的热量,即

$$m_L C_{pL} \dot{L} = V_{LW} r_p H_r - KA (\dot{M} - M) \quad (3)$$

以上三式中,参数包括: $r_p$ :聚合速率, $k_p$ :粒内链生长常数, $[M]_p$ :粒子内单体的浓度, $n$ :每一乳胶粒子中所含游离基数目的平均值, $N$ :单位体积水中的粒子总数, $N_A$ :Avogadro 常数, $K_0$ :频率因子, $E$ :表观活化能, $R$ :气体常数, $m_M$ :反应釜壁的质量, $C_{pM}$ :反应釜壁的比热容, $K$ :夹套换热器总传热系数, $A$ :换热面积, $h_{CWR}$ :冷却回水的热焓, $h_{CWS}$ :冷却供水的热焓, $m_L$ :釜内液体的质量, $C_{pL}$ :釜内液体的比热容, $V_{LW}$ :釜内水相的总体积, $H_r$ :聚合热.其中时变的参数有  $r_p$ ,  $[M]_p$ ,  $n$ ,  $N$ ,  $K_0$ ,  $C_{pL}$  等.变量包括: $\dot{L}$ :釜内液体的绝对温度, $K$ ;  $W_{CWS}$ :冷却水的质量流量,  $m^3/s$ ;  $M$ :反应釜壁的温度,  $K$ .

式(1)、(2)、(3)即为聚合釜匀速聚合阶段的数学

模型,它是一个非线性并且参数时变的系统.厦门电化厂实验证明,该模型是符合 ACR 聚合反应釜温度变化主要规律的.

为便于研究控制算法,将式(1)线性化,并联立(2)、(3)求解.增量化,消去  $M$ ,经整理得到一个二阶线性微分方程:

$$C_1 C_3 \ddot{\Delta T} + (C_1 - C_2 C_3) \dot{\Delta T} - (C_2 + 1) \Delta T = -C_4 W_{CWS}(t)$$

其中,被控量  $\Delta T(t)$  表示当前温度距离目标温度的变化量,控制量  $W_{CWS}(t)$  表示夹套中冷却水的变化量, $C_1, C_2, C_3, C_4$  均为含以上参数的表达式.再考虑到乳液聚合反应釜的纯滞后特性,匀速聚合阶段的传递函数为

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{W_{CWS}(s)} = \frac{-C_4 e^{-s}}{C_1 C_3 s^2 + (C_1 - C_2 C_3) s - (C_2 + 1)} \quad (4)$$

## 2 Smith-fuzzy 控制算法研究

由于系统带有纯滞后,常采用 Smith 预估器,而传统 Smith 预估控制中的 PID 控制器是基于被控对象精确模型而设计的.由于目前人们对聚合反应过程的了解还不够充分,聚合釜精确的数学模型及其参数值很难得到,因此应用 Smith-PID 控制难以收到满意的效果.

模糊控制通过总结人的操作经验,模拟人的思维进行控制,不需要对系统数学模型进行精确的描述,正适合于模型未知或多变的过程控制,它的鲁棒性强,尤其适合于非线性、时变的系统的控制<sup>[4]</sup>.针对聚合釜这样的控制对象,本文结合 Smith 预估控制和模糊控制原理,设计出一种史密斯模糊 (Smith-fuzzy) 控制方法.

### 2.1 模糊控制器的工作原理

对于二阶对象,取反应釜温度偏差  $E$  和偏差变化  $C$  作为模糊控制器的输入语言变量,冷却水流量  $U$  作为输出语言变量,则可设计一个二维输入单输出的模糊控制器.聚合釜模糊控制器的工作原理参见图 2,可分为模糊输入接口、模糊推理判别决策机构和模糊输出接口三个部分.

### 2.2 零间断点的处理

由于乳液聚合反应釜的模糊控制器是针对恒温控制要求而设计的,而温度控制的对象是大惯性、大时滞系统,存在明显的延迟作用,故控制策略严重依赖于系统的历史状态.基于这种考虑, $E$  和  $C$  的模糊子集应该都包括 NO(负零)、PO(正零).输出变量  $U$  也应分为

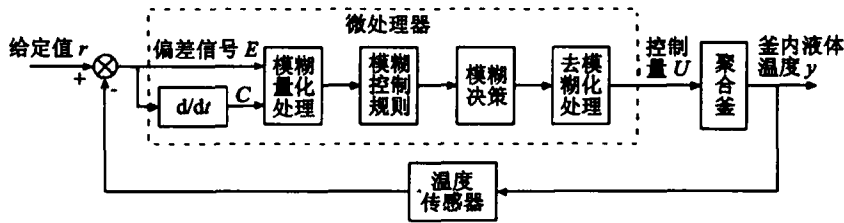


图 2 模糊控制器的基本结构

Fig. 2 Basic structure of fuzzy controller

NO 和 PO. 从后面的模糊规则表(表 1)中可以看到,对  $E$  和  $C$  的 NO、PO 点有不同的控制输出,可以说在量化论域的零点是间断点,这就是乳液聚合反应釜模糊控制器的一个特殊问题.

取温度偏差  $E$  的基本论域为  $[-7, 7]$ . 模糊子集的论域为  $E = \{-9, -8, \dots, -1, 0, 1, \dots, 8, 9\}$ , 则量化因子  $K_e = 9/7 = 1.286$ . 相应的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$ . 温度偏差变化  $C$  的基本论域为  $[-2, 2]$ . 模糊子集的论域为  $C = \{-11, -10, \dots, -1, 0, 1, \dots, 10, 11\}$ , 则量化因子  $K_c = 11/2 = 5.5$ . 相应的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$ . 输出变量  $U$  的基本论域为  $[-35, 35]$ , 模糊子集的论域为  $U = \{-10, \dots, -1, 0, 1, \dots, 10\}$ , 则比例因子  $K_u = 35/10 = 3.5$ . 相应的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$ .

### 2.3 模糊变量的隶属度函数

如图 3, 本系统中隶属度函数都取为三角形<sup>[5]</sup>. 其中  $E$  的隶属函数的选取不同于  $C$  和  $U$ , 这是因为, 在聚合反应釜问题上, 对超调量的要求比对过渡时间更严格

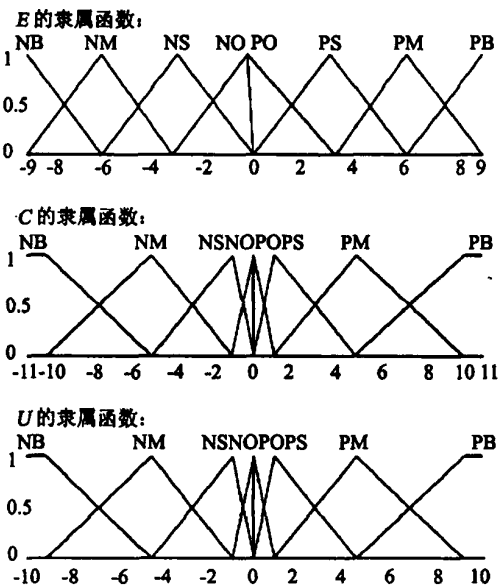


图 3 模糊变量的隶属度函数

Fig. 3 Membership function of fuzzy variables

### 2.4 模糊控制规则表的调整

二维模糊控制器常采用 Mamdani 控制规则, 在该规则中, 误差和误差变化对模糊控制器的影响是相同的, 大体可表示为  $U = -(E + C)/2$ . 而事实上,  $E$  和  $C$  在不同的阶段对控制器应有不同的影响. 例如, 在阶跃响应的初始阶段,  $E$  是主要矛盾, 应加大误差的权重; 在中期阶段, 为减小系统的超调, 应突出误差变化的作用, 等等. 于是上式可改写为

$$U = -(\alpha_1 E + \alpha_2 C) \quad (5)$$

其中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  是两个权值参数, 用于调整误差和误差变化在不同阶段的作用, 选取如下:

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 = \begin{cases} 0.50, & E = 0 \\ 0.40, & E = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \\ 0.65, & E = \pm 4, \pm 5, \pm 6 \\ 0.75, & E = \pm 7, \pm 8, \pm 9 \end{cases}$$

按式(5)设计控制表, 经过与相关领域专家的多次探讨, 结合手动经验, 并经仿真测试优化, 得到  $8 \times 8 = 64$  条模糊控制规则如表 1.

表 1 模糊控制规则表

Tab. 1 Rule table of fuzzy control

E	C							
	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	PO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PO	NO
NS	PB	PM	PM	PS	PS	PO	NO	NS
NO	PM	PM	PS	PS	PO	NS	NS	NM
PO	PM	PS	PS	NO	NS	NS	NM	NM
PS	PS	PO	NO	NS	NS	NM	NM	NB
PM	PO	NO	NS	NS	NM	NM	NB	NB
PB	NO	NS	NM	NB	NB	NB	NB	NB

经过推理运算, 可以得到总的模糊关系阵  $R, R = A_i \times B_j \times C_{ij}$ , 其中  $A_i, B_j, C_{ij}$  分别为  $E, C, U$  的模糊子集. 根据模糊推理合成规则得到输出为  $U = (A \times B) \circ R$ , 控制过程中, 根据模糊量化后的误差值及误差

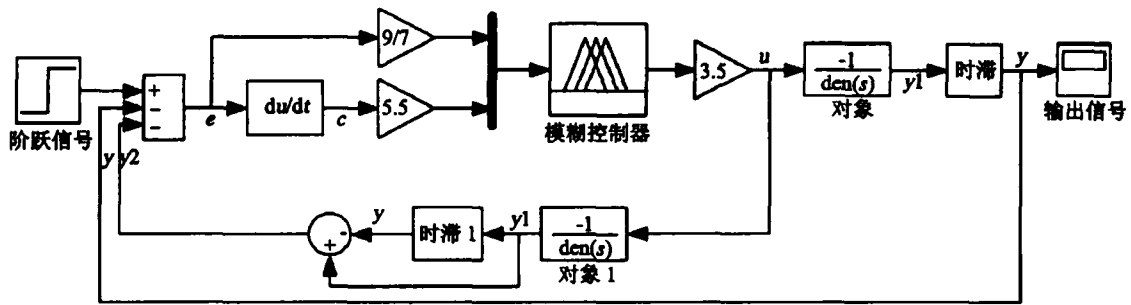


图 4 Smith-fuzzy 控制系统方框图

Fig. 4 Square frame diagram of Smith-fuzzy control system

变化值,直接查找规则表以获得控制量的变化值  $u_{ij}$ ,再经去模糊化,即  $u_{ij}$  再乘以比例因子  $K_u$  即可作为输出量  $U$  去控制夹套中冷却水 / 蒸汽的流量.

### 2.5 比例因子的自调整

典型的模糊控制器参数为一组固定的常量,对于非线性、时变、大滞后以及随机干扰较严重的控制对象来说,难以同时获得满意的动静态特性.因此本系统中令比例因子  $K_u$  进行自调整来改善系统的动态性能.  $K_u$  作为模糊控制器的总的增益,过小会使系统动态响应过程变长,过大又会导致系统振荡.因此应在不同的系统状态下调整  $K_u$  为不同的值.确定调整规则为

$$K_u = \begin{cases} K_{u1}, & \text{当 } |E| > E_1, |C| > C_1 \\ K_{u2}, & \text{当 } E_1 < |E| < E_2, C_1 < |C| < C_2 \\ K_{u3}, & \text{当 } |E| < E_2, |C| < C_2 \end{cases}$$

其中,  $K_{u1}, K_{u2}, K_{u3}$ :  $K_u$  在系统不同状态下的取值;  $E_1, E_2$ : 误差  $E$  的阈值,  $E_1 > E_2$ ;  $C_1, C_2$ : 误差变化  $E_c$  的阈值,  $C_1 > C_2$ . 在仿真实验中,采用的一组参数是: ( $K_{u1}, K_{u2}, K_{u3}$ ) = (7, 42, 3); ( $E_1, E_2$ ) = (0.8, 0.1); ( $C_1, C_2$ ) = (0.005, 0.002).

### 2.6 Smith-fuzzy 控制系统方框图

以模糊控制器为控制器,结合 Smith 预估补偿器,即构成 Smith-fuzzy 控制系统,其 Simulink 方框图如图 4.

## 3 仿真实验分析

### 3.1 与 Smith-PID 控制的性能比较

将实际 ACR 聚合反应釜生产中的一组参数值代入式(4),得到一个具体的系统传递函数

$$G(s) = \frac{-e^{-200s}}{29403s^2 + 144.4s - 0.0375}$$

其中纯滞后时间为 200 s.将该函数作为被控对象进行仿真实验,用阶跃输入响应测试系统性能,程序在 Matlab 6.5 中编写.为了比较 Smith-fuzzy 控制和 Smith-PID 控制的控制性能,进行了两种控制对同一

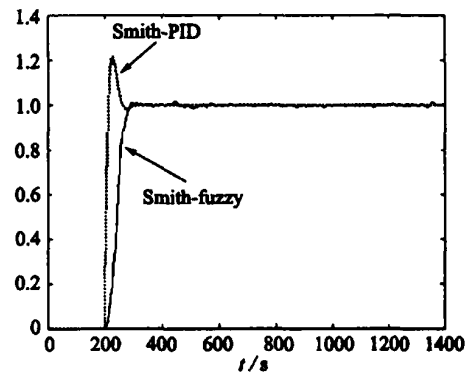


图 5 Smith-fuzzy 和 Smith-PID 控制效果对比

Fig. 5 Contrast of Smith-fuzzy and Smith-PID control effect

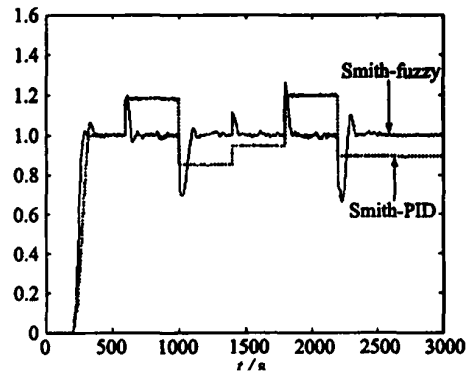


图 6 系统参数时变情况下的仿真对比

Fig. 6 Simulation contrast when system parameters are variable

被控对象的仿真. Smith-PID 控制器按照二阶系统最佳用稳定边界法进行整定,仿真运行后得到如图 5.可见,尽管 Smith-PID 控制的过渡时间较快,但超调量较大,为 0.2;而 Smith-fuzzy 控制的超调仅为 0.02,兼顾了聚合釜温度控制对超调量和过渡时间两方面的要求.

### 3.2 抗干扰性能比较

为了比较控制器的抗干扰性能,假设被控对象参

数每隔 500 s 发生变化. 仿真实验中令被控对象状态方程的系数阵  $A$  和  $C$  每隔 500 s 发生正弦变化,如图 6,这时 Smith-fuzzy 控制系统表现出明显比较强的抗干扰能力. 由于系统中总会存在不确定因素,系统参数会随时间出现不同程度的变化,使得 Smith 预估器的参数和系统参数不完全匹配,传统的 Smith-PID 控制器就会失去作用,反而使系统出现严重的振荡,甚至不稳定. 图示的对比结果体现出 Smith-fuzzy 控制在这一方面做出的改进.

## 4 讨 论

Smith-fuzzy 控制的优点:仿真结果表明,本文设计的 Smith-fuzzy 控制方法结合了 Smith 预估控制和模糊控制的优点,超调量很小,调整时间短,稳态误差小,具备较强的抗干扰能力,达到了理想的温度控制效果.

Smith-fuzzy 控制的不足之处:调整速度比较缓慢(就聚合釜的温度控制而言,在允许范围之内). 这是因

为它只是依靠模糊推理得到一个大致的控制量,而不是象 PID 那样的精确控制. 即使模糊控制系统能够设计得更加精确,它的上升时间和过渡时间可以缩短,但随之而来的可能是系统的不稳定和超调率的增大.

尽管存在以上不足,Smith-fuzzy 控制仍然以其很小的超调量和较高的适应性而在 ACR 聚合反应釜的温度控制中得到了成功应用.

## 参考文献:

- [1] 朴春俊,陈彩莲. 模糊控制在聚合反应釜中的应用及仿真研究[J]. 系统仿真学报,2001,13(5):558-566.
- [2] 周笋. 聚合反应釜的建模分析、算法研究与模拟系统开发[D]. 厦门:厦门大学,2003.
- [3] 陈甘棠. 聚合反应工程基础[M]. 北京:中国石化出版社,1991.
- [4] 李士勇. 模糊控制和智能控制理论与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990.
- [5] 窦振中. 模糊逻辑控制技术及其应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995.

# Modeling and Control Method Research of ACR Polyreactor

ZHOU Sun,JI Guo-li \*

(Department of Automation,Xiamen University,Xiamen 361005,China)

**Abstract:** Since latex polymerization course is very complex, modeling of polyreactor is a difficulty in polyreaction engineering. In this paper, qualitative characteristic of latex polyreaction mechanism was analysed, and with statistic law about how polymerization speed varying with transformation rate, the mathematics model of Acrylate Copolymer Resin (ACR) polyreactor was set up about the temperature variety. Its characteristic is: nonlinear, parameter time-varying and having lag. According to this kind of control plant, on the basis of Smith prediction control and fuzzy control theory, a Smith-fuzzy control method was designed, and the adjustment method of control rule table and proportion factor, etc. was given to improve the system dynamic performance. Simulation experiments were carried through on two conditions of constant and variable system parameters. Compared with traditional Smith-PID control, Smith-fuzzy control is proved to achieve ideal control effect and have strong anti-interference capability.

**Key words:** polyreactor; Smith-fuzzy control; simulation