

基于插值模糊控制的反应釜目标温度优化设计

艾丽萍, 潘海鹏

(浙江理工大学自动化研究所, 杭州 310018)

摘要: 为得到反应釜温度良好的控制效果,需克服反应釜温度控制系统的大惯性、时变与非线性特性。以常规模糊控制为基础,结合插值算法,设计了一种新型的反应釜目标温度优化方案。采用离线计算、在线查表的方式,使计算简便、控制简单。仿真结果表明,该方法具有控制精确度高、动态性能好以及跟踪能力强的特点。

关键词: 反应釜; 温度; 模糊算法; 优化

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A

0 引言

反应釜是乙酸乙酯生产过程中的关键设备,因其化学反应机理复杂,易受外界条件、反应物料纯度、导热油和循环水温等众多因素影响,系统具有非线性、大惯性及时变性等特点。由于釜内反应过程中转化率等过程参数测量困难,选择温度作为系统的控制参数成为一种有效的控制方法^[1]。多年来,许多学者在反应釜温控系统上做了大量的探索并提出了一些有效的解决方案,如 Barry 与 Sandro^[2]采用 GMC 方法控制反应釜的温度,进一步验证了该方法能够增强操作条件与过程参数变化时系统的鲁棒性;Nagy Z 等^[3]提出了一种模糊控制与 PID 结合的方法,通过模糊控制器的输出调整 PID 控制器的设定值以补偿反应放热对温度造成的扰动。在国内,Xia X H^[4]等采用基于小波神经网络的预测控制算法控制间歇聚丙烯反应器温度;文献[5]根据聚合反应釜温度控制特性得到了一种较为理想的史密斯-模糊控制方法,获得了良好的仿真效果;文献[6]设计的免疫模糊自适应 PID 算法改善了温控系统的跟踪性能;文献[7]将免疫与模糊算法结合,用于反应釜的温度控制,提高了系统的控制精度;文献[8]通过使用模糊自适应 PID 算法解决了反应釜的

温度控制问题。由此可见,模糊控制用于反应釜温度控制已很常见,它能对反应釜这类难以建立精确数学模型的非线性复杂系统进行简单有效的控制,具有动态性好、响应快速、超调小、鲁棒性强等诸多优点^[9-11]。但是总结上述模糊算法,仍存在一些不足:如反应釜的迟滞时间常数太大,会导致系统的响应过慢;扰动过大时,可能造成系统崩溃;信息的获取不够全面;精度不够高。

本文针对模糊控制的不足,提出了一种新型模糊算法,在简单查表基础上,运用数学双插值方法尽可能保留多的信息,并模拟人为操作修正给定值实现目标优化。此算法简单明了,控制精确,能够保证反应釜的温度在一定的高、低限范围波动,具有良好的跟踪效果和能动性,可以有效应用于化工生产中反应釜的温度控制。

1 新算法的各个组成部分

1.1 常规模糊算法

模糊控制是总结长期生产生活过程中的各种经验,模拟人的思维决策选择合适的控制规则策略,适用于大惯性、非线性、时变及数学模型不精确的控制系统。模糊控制算法的步骤主要有以下三步:

a)由实际控制对象和操作经验得出模糊控制规

则表:

b) 根据控制规则表计算出模糊关系矩阵;

c) 计算不同模糊输入值以及隶属度函数下对应的模糊输出量的大小。

1.2 双线性插值法

在使用模糊规则表对连续的精确量进行模糊化的过程中,选取整数的间隔过大会造成信息量严重损失,而在将模糊量精确化的时候,前后两个模糊量之间离散化时,输出控制量必然会产生一个跃变,造成控制器的模拟量输出随之产生跃变^[14]。为了进一步改善系统性能,引入双线性插值法。双线性插值是两个变量的插值函数的线性插值扩展,其核心思想是在两个方向分别进行一次线性插值,可用下式表示,

$$y(x) = y_i + (y_{i+1} - y_i)(x - x_i) / (x_{i+1} - x_i) \quad (1)$$

其中,假设 x_i, x_{i+1} 是相邻两自变量的模糊值; y_i, y_{i+1} 是与之对应的因变量的模糊值。

设两输入变量的量化值 $E(t) \in [E_i, E_{i+1}]$, $EC(t) \in [EC_i, EC_{i+1}]$, 则输出量 $U(t)$ 可根据以下公式导出插值算法。

$$U_1(t) = U_{ij} + (U_{i+1,j} - U_{ij}) \cdot A_{i+1}(E) \quad (2)$$

$$U_2(t) = U_{i,j+1} + (U_{i+1,j+1} - U_{i,j+1}) \cdot A_{i+1}(E) \quad (3)$$

$$U(t) = U_1(t) + [U_2(t) - U_1(t)] \cdot A_{i+1}(EC) \quad (4)$$

其中 $A_{i+1}(E) = (E(t) - E_i) / (E_{i+1} - E_i)$, $A_{i+1}(EC) = (EC(t) - EC_i) / (EC_{i+1} - EC_i)$ 。

E_i 为误差模糊子集中的第 i 个模糊量, EC_i 为误差变化率模糊子集中的第 i 个模糊量, U_{ij} 为模糊控制器输入 E_i, EC_i 时对应的输出值,其他依此类推。

1.3 仿人目标优化

为了克服模糊控制带来的输出有起伏且稳态精度不高的现象,笔者模仿人的这一操作过程,设计仿人目标优化算法对系统优化,以期达到快速提高稳态精度的目的。仿人目标优化算法的推理过程是根据人的思维,判断系统的稳态精度是否满足要求,首先选取评价性能指标函数:

$$J(n) = \sum_{i=n-N_d}^n e(i) \quad (5)$$

式中 $e(i)$ 为实际输出与给定量之差,即输出误差, N_d 为被控对象的时滞时间常数。

仿人目标优化算法有两种策略:首先确定系统的稳态阈值 J_w 和精度阈值 J_f ,然后在符合稳定阈

值 J_w 的情况下, $J(n) < J_f$ 时,即精度合适时,采用插值模糊控制算法;而 $J(n) \geq J_f$ 时,则采用基于仿人目标优化的插值模糊算法,即在使用插值模糊算法前先模拟人的操作对给定量进行反方向的修正,其修正算法为,

$$\tilde{r} = r + f \cdot e^2(t) \quad (6)$$

式(6)中: \tilde{r} 为修正后的给定值, r 为修正前的给定值, f 为可调常数,可在 $0.5 \sim 2$ 之间取值。

算法的思想体现在:当 $e > 0$ 且越大,则实际输出越来越大于给定值,因而需要增大给定值以减小误差;反之,当 $e < 0$ 且越小时,表明实际输出越来越小于给定值,因而需要减小给定值以减小误差。由于 f 的取值较小,使得给定只在很小的范围内波动,通过这一波动可以弥补误差给系统带来的影响。

1.4 收敛性分析

由式(5)、式(6)所示,假设 N_d 为零,系统可生成以下描述结论:

$$J(k+1) = J(k) + e(k+1) \quad (7)$$

$$e(k+1) = r(k+1) - Q \cdot e(k) \quad (8)$$

$$r(k+1) = r(k) + f(k) \cdot e^2(k) \quad (9)$$

由式(7)、式(8)、式(9)可得:

$$J(k+1) = J(k) + r(k) + f(k) \cdot e^2(k) - Q \cdot e(k) \quad (10)$$

当目标优化不参与控制时,也即优化控制量 $f(k) = 0$,则式(10)可变为:

$$J(k+1) = J(k) + r(k) - Q \cdot e(k) \quad (11)$$

其中: Q 为非线性系统的传递正定矩阵, $f(k)$ 即是优化参数。

定理:对于性能指标函数式(5)和优化策略式(11),那么有性能指标函数是一个单调递增的序列,即 $J(k) > J(k-1)$,存在 B ,使得性能指标序列 $J(k+1) \leq B$ 。

证明:对一任意的优化控制量 $f(k)$,以及相应的性能指标函数 $\Omega(k+1)$ 定义如下:

$$\Omega(k+1) = \Omega(k) + r(k) + f(k) \cdot e^2(k) - Q \cdot e(k) \quad (12)$$

由 $f(k) > 0$ 与式(11)可知:

$$J(k+1) \geq \Omega(k+1) \quad (13)$$

而

$$J(k+1) - \Omega(k) = J(k) + r(k) - Q \cdot e(k) - \Omega(k-1) - r(k-1) - f(k-1) \cdot e^2(k-1) + Q \cdot e(k-1) \quad (14)$$

因为 $r(k)$ 为温度设定值, $r(k) = r(k-1)$ 所以有:

$$J(k) \geq \Omega(k-1) \tag{15}$$

由式(13)、式(15),可以得到:

$$J(k) \geq J(k-1) \tag{16}$$

证明性能指标函数的有界性:

由式(12),有

$$\begin{aligned} \Omega(k+1) = & \Omega(k) + r(k) + f(k) \cdot e^2(k) - Q \cdot e(k) + \\ & r(k-1) + f(k-1) \cdot e^2(k-1) - Q \cdot e(k-1) + \\ & \dots + \\ & r(0) + f(0) \cdot e^2(0) - Q \cdot e(0) \end{aligned} \tag{17}$$

因为 $f(k)$ 为 0.5~2 之间任意可允许控制,所以

$$\begin{aligned} \Omega(k+1) = & \sum_{i=0}^k (r(i) + f(i) \cdot e^2(i) - Q \cdot e(i)) \\ \leq & \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^k (r(i) + f(i) \cdot e^2(i) - Q \cdot e(i)) \\ \leq & B \end{aligned} \tag{18}$$

再由式(13)可得

$$J(k+1) \leq B \tag{19}$$

2 新算法的计算步骤

Step1: 离线计算出模糊控制量表,并存贮在计算机中;

Step2: 采样并计算得出偏差 $e(t)$ 并根据偏差绝对值 $|e(t)|$ 的大小,经由 J_w 判断系统是否进入稳态,若是进入稳态,再由目标函数判断 $J(n)$ 与 J_f 的大小,若 $J(n) < J_f$,则转 Step4;

Step3: 若 $J(n) \geq J_f$,则由式(6)对给定值进行修正;

Step4: 求出偏差 $e(t)$ 和偏差变化率 $ec(t)$,再对 $e(t)$ 和 $ec(t)$ 进行量化,求得 $E(t)$ 和 $EC(t)$,然后确定其在模糊控制量表中对应的论域 (E_i, E_{i+1}) 和 (EC_i, EC_{i+1}) ,从模糊控制量表中查出相应 U_{ij} , $U_{i+1,j}$, $U_{i,j+1}$ 和 $U_{i+1,j+1}$,再计算出 $A_{i+1}(E)$ 和 $A_{i+1}(EC)$,最后代入式(2)、式(3)、式(4),得到模糊量输出 $U(t)$;

Step5: 将模糊量输出 $U(t)$ 乘以比例因子 Ku ,即可得到控制输出 $u(t)$;

Step6: 更新控制步数,若控制过程仍未结束,则转 Step1。

3 应用实例

3.1 工艺特点

控制对象为带搅拌釜式反应器系统,属于放热

间歇反应过程,物料乙酸和乙脂在催化剂的作用下聚合,生成产物乙酸乙酯。反应过程中必须随时监测釜内的压力和温度以保证产物的质量,反应釜内温度通过电加热夹套内的导热油来提升,反之则通过冷却水降低。

3.2 控制系统的结构

控制系统由带夹套的反应釜,插值模糊控制器,目标优化调节器,热电阻元件以及阀门等部分组成,其结构如图 1 所示。

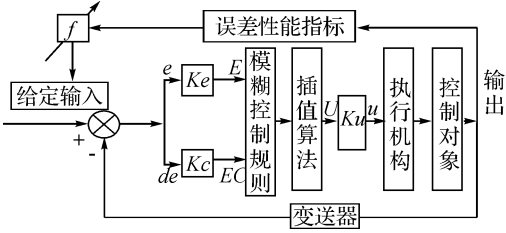


图 1 控制系统结构

过程原理: 将反应物计量加入釜内,添加催化剂后,通过电加热夹套内的导热油使釜内反应物开始反应。在反应过程中,插值模糊规则控制器控制给定输入温度与反馈输出温度,比较所得的误差和误差变化率,得到一个输出可调节电压大小,同时调节冷却水阀门开启,最终实现反应釜内温度的调节。在整个控制过程中,若出现较大的偏差,则进行仿人操作修正给定值,同时插值模糊控制器不断对信息进行复原,从而达到更为精确的跟踪效果。

3.3 模型的建立

根据机理建模法确定化工生产乙酸乙酯聚合反应釜的数学模型为:

$$G(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts+1} \tag{20}$$

试验参数比例系数 $k=1.2$,时间常数 $T=80$,延迟系数 $\tau=100$, $J_w=5$, $J_f=0.5$, $f=1$ 。

根据工艺要求可知,系统允许的温度偏差基本论域为 $(-0.6^{\circ}\text{C}, 0.6^{\circ}\text{C})$,偏差变化率的基本论域为 $(-0.5, 0.5)$,将其模糊化后,得到温差和温差变化率的模糊论域均为 $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$,模糊输出论域为 $(-3, 3)$ 。温差、温差变化率和输出均采用 7 个模糊子集,即 $\{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\}$ 。在确定了输入输出变量及其论域后,仿真时采用了 Z 型函数和三角形函数作为隶属度函数,曲线如下:图 2 为温度误差的隶属函数,图 3 为温度误差变化的隶属函数,图 4 为输出的隶属函数。

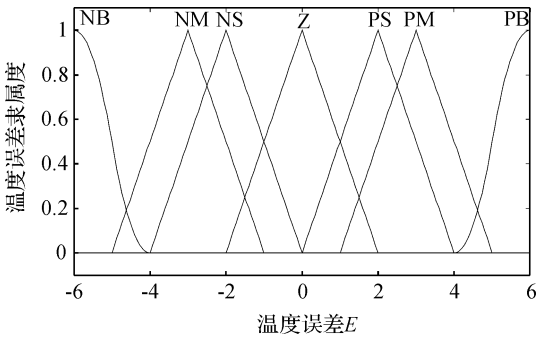


图 2 温差隶属函数

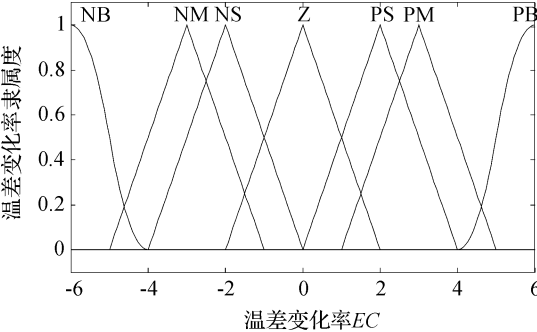


图 3 温差变化率隶属函数

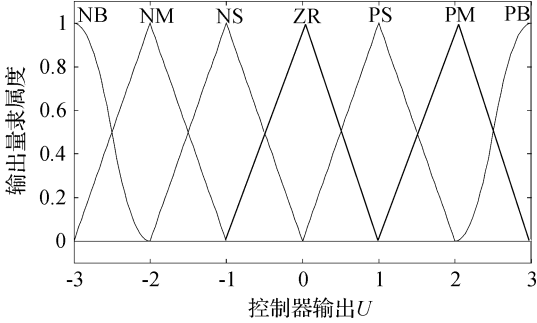


图 4 输出隶属函数

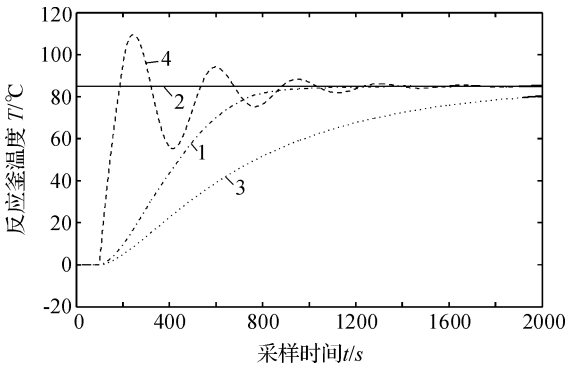
设温度的误差为 E , 温度误差的变化率为 EC , 输出控制量为 U 。根据反应釜温度控制的历史经验总结获得以下模糊控制规则, 如表 1 所示。

表 1 模糊推理所得输出控制量 U

EU	E						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZR
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZR	ZR
NS	PM	PM	PS	PS	ZR	ZR	NS
ZR	PM	PS	PS	ZR	ZR	NS	NS
PS	PS	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM
PM	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM
PB	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM	NB

3.4 仿真结果

用 Matlab 仿真结果如图 5 所示(根据隶属度、模糊量实际值和论域, 取 $Ke=10, Kc=12, Ku=0.2, Ki=0.002$)。



1. 基于插值模糊控制的反应釜目标温度优化设计, 2. 温度给定值, 3. 常规模糊控制, 4. PID 算法控制

图 5 系统仿真结果

从仿真效果可以看出, 采用基于目标优化的双线性插值模糊算法比一般的模糊算法及 PID 算法的控制效果更为理想, 由于它采用了简单的查表和插值算法, 方便易用, 运算量小, 占用内存少, 稳态误差极小, 控制精度可以达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 不仅避免了 PID 算法的振荡超调, 而且系统的响应速度要高于常规模糊控制算法。

4 结 语

针对反应釜的温度控制算法的不足, 提出了一种基于目标优化的双线性插值模糊算法。该算法结合了仿人智能对非线性的良好处理优势及插值法对信息保存的完备性优势, 使系统快速地进入稳态, 避免了经典控制对过程建模以及常规模糊控制对操作经验的过分依赖, 克服了 PID 控制对非线性系统带来的超调过大及震荡等缺陷, 也弥补了常规模糊控制的精度不高以及进入控制稳态缓慢等不足, 实现了对系统的有效控制。

参考文献:

[1] 王春雷, 邓远超, 费 凌. 反应釜温控系统的积分分离 PID 算法及仿真[J]. 机械工程与自动化, 2009(4): 70-72.

[2] Barry J C, Saadro M. Temperature control of exothermic batch reactors using generic model control[J]. Engineering Chemistry Research, 1989, 28: 1177-1184.

[3] Nagy Z, Agachi S. Model predictive control of a PVC batch reactor[J]. Computers & Chemical Engineering, 1997, 21: 571-591.

[4] Xia X H, Luan Z Y, Huang D X, et. al. Nonlinear predictive control based on wavelet neural network applied to polypropylene process[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005(3): 131-136.

[5] 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): 558-559.

[6] 高宪文, 赵亚平. 焦炉模糊免疫自适应 PID 控制的应用研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(12): 1346-1349.

[7] 朱红霞, 沈 炯, 王培红, 等. 基于免疫遗传算法的模糊优化控制及其仿真[J]. 东南大学学报, 2005, 35(1): 64-67.

[8] 陈黎明, 马德毅. 基于模糊自适应 PID 的反应釜液位控制[J]. 电气技术与自动化, 2009, 38(1): 140-143.

[9] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.

[10] 李友善, 李 军. 模糊控制理论及其在过程控制中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[11] 李国勇. 神经模糊控制理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[12] 周孚宏. 应用于 PLC 的一种新的模糊控制算法[J]. 自动化仪表, 2005, 26(5): 57-61.

Design of Reactor Aimed Temperature Optimization Based on Interpolation Fuzzy Control

AI Li-ping, PAN Hai-peng

(Institute of Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The design of a new reactor aimed at temperature optimization which combines conventional fuzzy control and interpolation algorithm is proposed, in order to overcome large inertia, time varying and nonlinear characteristics of the reactor temperature control system, and to get a good control effect, the off-line calculation and on-line look-up table method is simple, and achieves a simple control of system. The simulation results show that the design method has high control precision, good dynamic performance and tracking ability.

Key words: reactor; temperature; fuzzy algorithm; optimization

(责任编辑: 杨元兆)