

# 加入 PSO 算法在蔗糖结晶模糊控制中的应用

潘泽锴, 周晓芳

(广西职业技术学院 制糖过程控制技术实训中心, 南宁 530226)

**摘要:** 在煮糖过程中人为因素对出糖数量和质量都有很大的影响, 而蔗糖结晶过程难以建立准确的数学模型使得传统的控制方法无法实现精准控制, 在总结经典 PID 控制和已经实际应用的蔗糖结晶过程模糊控制理论的基础上, 提出了采用模糊推理对 PID 控制器参数进行自整定, 加入改进粒子群算法对控制器过程参数进行优化调整, 完成融入 PSO 算法的蔗糖结晶过程模糊控制器的设计, 利用每次控制输出反馈自整定来提高控制器性能; 通过 Matlab 软件模拟仿真测试效果表明, 该方法增强了系统鲁棒性, 可以提高出糖的品质。

**关键词:** 蔗糖结晶; 过程控制; 模糊控制; 粒子群算法

## Application of PSO Algorithm to Fuzzy Control of Sucrose Crystallization

Pan Zekai, Zhou Xiaofang

(Technology Training Center of Sugar Process Control, Guangxi Vocational & Technical College, Nanning 530226, China)

**Abstract:** In the process of boiling sugar, human factors have a great influence on the quantity and quality of sugar. It is difficult to find accurate mathematical models of sucrose crystallization's process, which is unable to achieve precise control by traditional control method. It use Fuzzy reasoning for auto-tuning of PID controller parameters. On the basis of summarizing the classical PID control theory and the practical application of sucrose crystallization process of fuzzy control theory, which added improved PSO algorithm to optimize and adjust the process parameters for the controller. It accomplished the design of PSO Algorithm to Fuzzy Control of Sucrose Crystallization. To improve performance, what is used to control output feedback controller auto-tuning each time. Simulation test results show that by using Matlab software. This methods can enhance system robustness and improve the quality of sugar.

**Keywords:** sucrose crystallization; process control; fuzzy control; PSO algorithm

## 0 引言

目前我国大部分糖厂煮糖自动化工序受到人为因素影响比较严重, 煮糖过程达的变化还主要是靠熟练操作工的观察和个人经验所影响, 随时适应各种客观情况, 进行人工的操作<sup>[1]</sup>。由于个体差异、标准不一等人为因素对出糖的数量和质量都有直接的关系。因此, 采用自动控制技术与模拟熟练、高效的工人操作, 克服人工操作的个人差异至关重要, 这样可以降低能耗, 提高产品质量<sup>[2]</sup>。然而, 蔗糖结晶过程本身就是一个复杂化学和物理变化过程, 在该过程中, 最后的出糖数量和质量是受到物料浓度、纯度、罐内真空度、气鼓加热蒸汽流量等多因素相互作用的结果, 难以用准确的数学模型表现出来, 使得在现阶段使用单一的控制方法无法得到满意的控制效果<sup>[3]</sup>。

在控制方式选择中, 传统 PID 控制需要对象是准确的控制模型, 模糊控制虽然不需要准确的数学模型, 但单纯的模糊控制存在精度不高, 本文把传统线性 PID 和模糊控制结合起来, 采用模糊推理, 对 PID 控制器参数进行自整定, 在这个闭环控制系统中, 加入粒子群算法对控制器过程参数进行优化调整, 对每次控制输出反馈自整定来提高控制器性能、增强系统鲁棒性<sup>[4]</sup>; 因此, 在原有控制理论的基础上, 加入粒子群算法在蔗糖结晶模糊控制应用中有其现实的意义。

## 1 蔗糖结晶模糊控制设计

蔗糖结晶过程本身就是一个复杂化学和物理变化过程, 最后的出糖数量和质量是受到物料浓度、纯度、罐内真空度、气鼓加热蒸汽流量等多因素相互作用的结果, 使用算法应控制母液的过饱和度在合理的范围之内, 在现阶段使用单一的控制方法无法得到满意的控制效果<sup>[5]</sup>。对比其他控制算法, PID 控制结构相对简单, 控制效果直接而且明显, 稳态精度也较高。

### 1.1 PID 控制基本设计

传统的 PID 控制对控制过程特性的变化适应度比较好, 达到稳态的过程没有静差, 鲁棒性也较强, 在生产过程中往往会想到采用 PID 控制, PID 控制系统作为传统自动控制系统原理简单, 使用方便, 也易于实现, 广泛应用与各种场合的工业自动控制系统中, 其工作原理如图 1 所示。

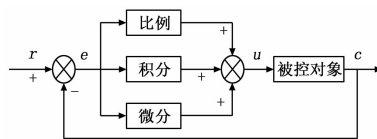


图 1 PID 控制系统原理图

但是 PID 控制不能简单地套用到煮糖过程控制当中来, 因为该过程变化是一种非线性的变化, 控制对象相对模糊。常规的 PID 控制器在煮糖自动控制系统固有的多干扰源、多参数变化的特性, 往往无法获得理想的控制效果, 特别是在系统参数变化范围较大的时候, 对系统连续煮糖的效果造成不利的影响, PID 控制在解决煮糖过程控制的这种大时滞、参数变化大和模糊不确定的过程控制无法满足控制要求<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2017-05-15; 修回日期: 2017-05-26。

基金项目: 广西高校科学技术研究项目 (KY2015YB384); 广西教育厅自然科学重点资助项目 (20161A023)。

作者简介: 潘泽锴 (1984-), 男, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事智能控制、工业自动化方向的研究。

### 1.2 蔗糖结晶过程模糊控制

从蔗糖结晶过程的数学模型可知糖膏的变化是一个大纯滞后变化过程，其滞后的时间受到末效蒸发水量、糖液黏度、糖浆温度等因素的影响，采用传统的史密斯校正效果不是很明显。为实现对这种复杂的、非线性、大滞后的控制对象理想控制，设计采用模糊控制器实现<sup>[6-7]</sup>。

1) 输入输出的模糊化：为了描述糖膏浓稀程度及其糖膏当前变化状态，采用测量值与设定值的偏差及偏差的变化率，当作二维模糊描述论域。选取语言变量值为 7 个：PB（正大），PM（正中），PS（正小），Z（零），NS（负小），NM（负中），NB（负大）。因此，偏差及其偏差变化率模糊子集为 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}。输出变量也可以用模糊集来表示：{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}。控制的 7 个等级可以描述成：PB（快速开），PM（中速开），PS（慢速开），Z（阀门不动），NS（慢速关），NM（中速关），NB（快速关）。

2) 编制模糊控制规则：模糊控制量的选取一般遵循一下两个原则：当偏差大或者较大时，模糊控制量的选择应当消除偏差为主；当偏差较小的时候，模糊控制的选择应当以系统的稳定为主，防止系统的超调。偏差  $\Delta e$  的语言有 7 个，偏差变化量  $\Delta ec$  的语言也有 7 个，若排列组合来考虑，可以有  $7 \times 7 = 49$  个模糊控制规则，将其整理成模糊控制规则表，如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

控制量 $u$	偏差 $\Delta e$							
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
偏差变化量 $\Delta ec$	NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	PS
	NS	NM	NM	NM	NS	Z	PS	PS
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
	PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	Z	PS	PM	PM	PM	PB
	PB	Z	Z	PM	PM	PM	PB	PB

## 2 引入 PSO 算法的蔗糖结晶过程模糊控制器设计

模糊控制虽然不需要准确的数学模型，但是单纯的模糊控制存在精度不高，容易产生极限环振荡等问题。有鉴于此，设计在经典 PID 控制中加入模糊参数控制规则，扬长避短，提高系统控制性能，把这套理论应用在控制过程中又出现了控制精度不够，在连续煮糖中有出现间歇控制的现象<sup>[8]</sup>。所以，在设计蔗糖结晶过程控制中，采用模糊推理，对 PID 控制器参数进行自整定，在这个闭环控制系统中，加入 PSO 算法对控制器参数进行优化调整，对每次控制输出反馈自适应整定，不断调整控制参数达到最优化输出的目的，使得系统的鲁棒性增强，提高可控性能。

### 2.1 引入粒子群算法优化控制参数

结合经典 PID 控制和模糊控制理论，模糊 PID 控制过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  和偏差  $\Delta e$ 、偏差变化量  $\Delta ec$  因子的随机变化都会影响输出控制效果，而在实际的煮糖过程中单凭个人经验的控制判断方法受人为因素干扰过大难以达到最优解。煮糖过程难以用某一特定的控制算法自动控制，在原有的模糊 PID 控制算法中引入改进的粒子群算法解决局部收敛的达到优化控制的目的<sup>[9]</sup>。

在引入的粒子群 PSO 算法中存在  $N$  维搜索空间，第  $i$  个

粒子可以用位置和速度的  $N$  维空间来表示其信息，位置信息可以表示为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})^T$ ，速度为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})^T$ ，在找到两个最优解后，粒子即可根据下式来更新自己的速度和位置：

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 \times rand_1^k \times (Pbest_{id}^k - x_{id}^k) + \\ c_2 \times rand_2^k \times (Gbest_d^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (1)$$

在式 (1) 中， $v_{id}^k$  表示第  $i$  个粒子在第  $k$  迭代中的第  $d$  维的速度； $x_{id}^k$  表示第  $i$  个粒子在第  $k$  次迭代中的第  $d$  维的位置； $Pbest_{id}^k$  是第  $i$  个粒子在第  $d$  维的个体极值点的位置； $Gbest_d^k$  是整个种群在第  $d$  维的全局极值点的位置； $i$  是整数，表示种群的大小； $c_1$  和  $c_2$  表示加速因子，在控制系统中，加速因子的选择既要加快收敛又要避免陷入局部最优的情况； $rand_1$  和  $rand_2$  取在  $[0, 1]$  之间的数<sup>[9-10]</sup>。把 PSO 算法加入煮糖过程控制中来，先对其解空间进行划分，划分过程中引入粒子与初始种群属性两个因素并对其进行排序操作，计算出最值空间和极值空间，得出种群稳定的概率值。

### 2.2 引入 PSO 算法的蔗糖结晶过程模糊控制器实现

模糊控制不需要精确的数学模型，模糊控制过程是一个柔性控制过程，适合在煮糖过程复杂变化中加入新的功能。在原有的过程中的模糊 PID 控制算法中，把经过反复实际煮糖操作经验总结成可用模糊集来表示的规则，并把这个规则加入工控机的模糊控制器中，运用模糊推理做出判决及输出控制量，对输出控制量加入粒子群算法对控制器参数进行优化调整，对每次控制输出反馈自整定，对比输出动态优化控制参数自整定，模糊复合控制器结构如图 2 所示。

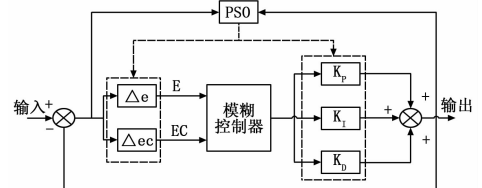


图 2 模糊复合控制器结构

在图 2 中，模糊控制器规则先用操作经验人员结成若干输出控制量，输入量偏差  $\Delta e$ 、偏差变化量  $\Delta ec$  通过 PSO 算法优化后经过模糊控制器规则，经过自整定的结果限定过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  变化输出的，PID 控制参数又通过 PSO 算法优化后反馈形成闭环控制，修正过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ ，通过 PSO 算法不断对输入量偏差  $\Delta e$ 、偏差变化量  $\Delta ec$  和过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  进行优化以实现自我学习整定的作用<sup>[11]</sup>。

在实际的操作过程中，偏差  $\Delta e$ 、偏差变化量  $\Delta ec$  初值可以根据煮糖人员操作经验跟定后即可进行前期的模糊化处理，输入输出的模糊化和编制模糊控制规则按照上述要求进行，实践证明模糊控制中的隶属度函数采用三角形隶属度函数快速而且高效，偏差  $\Delta e$ 、偏差变化量  $\Delta ec$  的隶属度如图 3 所示<sup>[8]</sup>。

如图 2，引入 PSO 算法后，改进模糊 PID 参数优化功能的整个过程：

- 1) 确定优化的参数偏差  $\Delta e$ 、偏差变化量  $\Delta ec$  和过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ ；
- 2) 对公式 (10) 中的粒子群初始参数进行设定；
- 3) 确定适应度函数为误差绝对值乘时间积分准则；

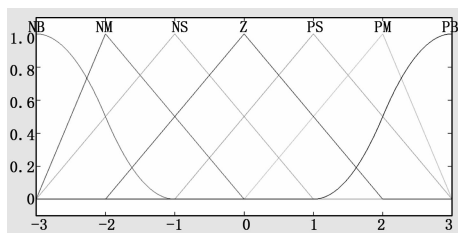


图 3 偏差和偏差变化量隶属度函数图

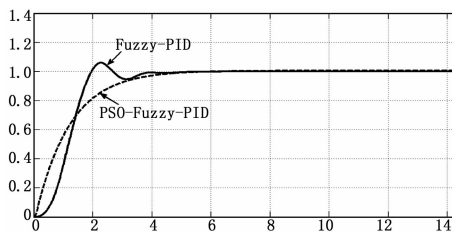


图 6 系统鲁棒性变化曲线

4) 以误差绝对值乘时间积分规则对公式 (10) 进行迭代运算, 对比最优个体适应值不断更新自身的最优位置, 不断在线优化参数偏差  $\Delta e$ 、偏差变化量  $\Delta ec$  和过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 。

模糊 PID 参数自整定过程就是确定过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  与  $\Delta e$  和  $\Delta ec$  之间的关系, 在复合控制器中, 根据模糊推理原理不断的寻找参数偏差  $\Delta e$  和偏差变化量  $\Delta ec$  的最优值, 根据 PSO 算法来对 PID 三个参数在线修改<sup>[11]</sup>。

### 3 仿真测试

在蔗糖结晶过程控制中, 为了验证模糊复合控制器的控制效果, 采用 Matlab 软件模拟仿真测试效果。在 PSO 算法初始值的设定中, 假设种群规模为 100, 最大的迭代次数为 100, 惯性因子为 0.6, 学习因子  $c_1$  和  $c_2$  分别为 2 和 2。在设计中, 利用 Simulink 仿真工具抽取模糊控制箱模块, 把上述煮糖过程模糊控制规则导入模糊控制器中。在该控制器中偏差  $\Delta e$ 、偏差变化量  $\Delta ec$  因子放大后加入阶跃保持器, 经过加入蔗糖结晶过程模糊规则的控制后, PID 控制的参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  对经过模糊控制器后的输出加以拟合限制<sup>[12]</sup>。建立的模糊逻辑控制器作为整体输入加入经过 PSO 算法优化的 PID 控制器中进行联合仿真, 在算法优化过程采用 ITAE 性能指标控制系统最优个体适应的稳定输出, 图 4 是最优个体适应变化曲线图, 从图中可以看出, 在总迭代次数五分之一的时候系统就基本达到稳定状态, 后面的时间搜索最优解收敛速度变慢, 这种情形有利于快速解决后期 PID 控制参数局部最优解的问题。

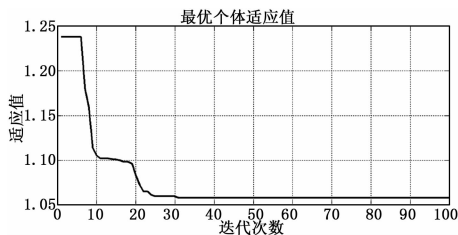


图 4 最优个体适应值变化曲线

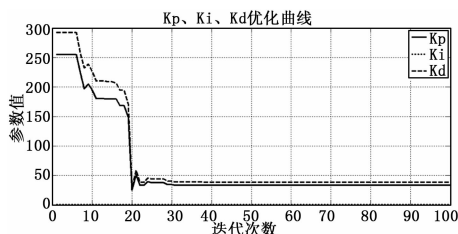


图 5 PID 控制参数优化变化曲线

根据蔗糖结晶过程的数学模型设定好参数后, 经过 PSO 优化的模糊 PID 控制过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  如图 5 所示, 从

图中可以看出最优个体适应变化稳态时间与过程参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  稳态时间基本一致, 这样有利于控制输出快速达到稳态, 减少超调时间, 增加系统稳定性。

经过 PSO 优化与传统的模糊 PID 控制对比如图 6 所示。针对于蔗糖结晶过程采用模糊过程控制算法是该自动控制领域常用的方法, 在系统仿真中, 比较模糊 PID 和 PSO 模糊 PID 两控制器过程变化曲线, 经过 PSO 优化的模糊 PID 控制过程变化平稳, 稳态误差小, 基本没有出现超调现象, 系统整体鲁棒性较强。

### 4 结束语

本文针对煮糖过程控制固有特性, 采用经典 PID 控制和模糊控制复合, 保持整个系统稳定控制的同时, 加入粒子群算法对控制器参数进行优化调整, 克服系统不确定性、降低系统超调量、增强系统鲁棒性; 把模糊复合智能控制算法加入煮糖自动控制可以减少操作人员的劳动强度, 不用操作人员经常抽取样棒和控制阀门, 避免了操作人员水平参差对煮糖的影响, 有益于提高出糖的数量和质量。

#### 参考文献:

- [1] Faria N, Pons M N, Feyeo A S, et al. Quantification of the morphology of sucrose crystals by image analysis. Powder Technology, 2003, 133: 54-67.
- [2] Martins P M, Rocha F. New developments on size-dependent growth applied to the crystallization of sucrose [J]. Surface Science, 2007, 601: 5466-5472.
- [3] 潘泽锴, 朱名日, 张振升. 基于蔗糖结晶过程的图像采集与控制研究 [J]. 制造业自动化, 2010 (9): 29-32.
- [4] 陈春林, 林荣武, 许家坤, 等. 间歇煮糖自动控制系统的研究与应用 [J]. 广西糖业, 2015 (1): 36-40.
- [5] 罗飞, 莫鸿强, 毛宗源. 基于遗传神经网络模型的蔗糖结晶过程预测控制 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2000, 28 (12): 48-53.
- [6] 兰红星, 易捷. 甘蔗糖生产自动化和信息化 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [7] 潘泽锴. 蔗糖结晶过程控制节点设计与研究 [J]. 食品与机械, 2016 (7): 89-92.
- [8] 樊春丽, 朱名日. 蔗糖结晶过程的建模与控制 [J]. 计算机系统应用, 2009, 18 (3): 38-41.
- [9] 赵伟, 蔡兴盛. 基于解空间划分的 PSO 改进算法 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2012, 50 (4): 725-732.
- [10] 黄麟, 荆萃, 赵翔东. 基于改进粒子群算法的主动悬架模糊 PID 控制研究 [J]. 煤矿机械, 2012, 33 (10): 39-41.
- [11] 刘伟锐, 赵恒华. 改进的 PSO 在并联机构模糊 PID 控制器中的应用 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014 (3): 114-120.
- [12] 张邦成, 李森, 高长春, 等. 基于模糊 PID 算法的轨道车辆 LED 照明控制系统设计 [J]. 控制工程, 2014, 21 (6): 882-890.