

文章编号: 1001-0920(2004)10-1097-04

基于 if-then 规则库的生产全过程优化 及其在加热炉温度设定中的应用

陈 庆, 李少远, 席裕庚

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘 要: 研究一类串联生产全过程基于 if-then 规则库的优化设定问题. 对串联生产全过程的优化设定问题进行描述, 利用 if-then 规则库来描述各子过程设定值变化量与最终产品质量的关系. 采用 Tsukamoto 模糊推理方法, 将带模糊约束的优化问题转化为清晰优化问题, 得到各子过程的优化设定值变化量. 以步进式加热炉的温度设定为例进行仿真, 验证了所提出方法的正确性.

关键词: 生产过程优化; 模糊优化; 串联过程; 加热炉

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Optimization of production process under if-then rules and its application to reheating furnace

CHEN Qing, LI Shao-yuan, XI Yu-geng

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China Correspondent: CHEN Qing, E-mail: king@sjtu.edu.cn)

Abstract An optimal setting method of a kind of cascade processes under if-then rules is studied. First, the optimal setting problem of cascade processes is described. A method is proposed, in which if-then rules are used to describe the relationship between the changes of set points for each sub-process and the final product quality. The fuzzy optimization problem is transformed into a crisp optimization problem by Tsukamoto's fuzzy reasoning method and the optimal set points for each sub-process are obtained. Simulation on the optimal setting for reheating furnace temperature shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: optimization of production process; fuzzy optimization; cascade process; reheating furnace

1 引 言

近年来, 全过程优化控制的研究引起人们的关注^[1]. 在炼钢、轧钢、造纸等生产过程中, 钢的成分、钢板厚度与板型、纸张质量等最终目标, 往往不是过程物理量的直接反映, 而是在经历了一系列过程控制后的最终结果. 象步进式加热炉这类生产过程, 是由若干个子过程构成的, 人们追求的是最终的产品质量, 如出炉钢坯温度和断面温差符合要求. 如何

建立各个子系统的设定值与最终产品质量的关系, 优化各个子系统的设定值便成为问题的关键.

大工业过程的稳态优化所依赖的精确数学模型一般无法得到. 例如加热炉的炉温优化设定问题, 必须假设一条全炉炉温分布曲线^[2,3]. 于是, 人工智能的概念和方法引入到大工业过程的优化, 基于模糊模型进行优化已取得一定的进展^[4,5].

本文研究一类串联生产全过程的设定值优化问

收稿日期: 2003-10-27; 修回日期: 2003-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69934020, 60074004); 高等学校博士点科研基金资助项目(20020248028).

作者简介: 陈庆(1975—), 男, 福建平潭人, 博士生, 从事预测控制、大系统的研究; 席裕庚(1946—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、智能机器人等研究.

题 首先利用 if-then 规则库来描述各子过程设定值变化量与最终产品质量的关系, 然后采用 Tsukamoto 模糊推理方法转化为清晰的优化问题求解, 最后结合步进式加热炉的温度设定进行仿真研究

2 一类串联生产全过程的优化

串联生产全过程由多个子过程串联而成, 每个子过程的控制作用相继发生, 追求的是最终产品质量. 现代工业生产过程一般采用分层递阶的优化控制结构, 用 DCS 来实现自动控制. 每个子过程都有分散控制器, 所要优化的是各子过程的设定值. 这类串联生产全过程如图 1 所示

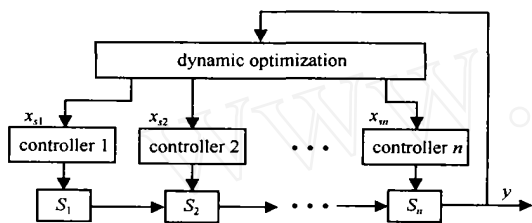


图 1 一类串联生产全过程

在图 1 中, S_1, S_2, \dots, S_n 是 n 个串联的子过程, $x_s = [x_{s1} \ x_{s2} \ \dots \ x_{sn}]$ 是各子过程的设定值, y 是最终产品质量. 当最终产品质量偏离期望值时, 必须在约束范围内动态调整各子过程的设定值, 同时保证生产全过程的能耗最小. 上层优化器根据最终产品质量和性能指标的要求, 动态调整各子过程控制器的设定值, 下层控制器使各子过程的输出跟踪优化设定值. 本文研究的是上层优化器的设计问题

设当前时刻各子过程的设定值为 $x^0 = [x_{s1}^0 \ x_{s2}^0 \ \dots \ x_{sn}^0]$, 期望的最终产品质量为 y^* , 当前时刻的产品质量为 y , 则产品质量偏差为 $\Delta y = y^* - y$. 假设各子过程的设定值变化量为 $\Delta x_s = [\Delta x_{s1} \ \Delta x_{s2} \ \dots \ \Delta x_{sn}]$, 它们之间满足如下映射关系:

$$\Delta y = f(\Delta x_s). \quad (1)$$

改变后的各子过程设定值为 $x_s = x^0 + \Delta x_s$, Δx_s 和 x_s 应满足工艺上的约束条件

$$\Delta x_s \in X_1, x_s \in X_2 \quad (2)$$

从工艺要求和节能降耗等经济目标出发, 系统优化性能指标可表示为

$$J = L(x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sn}). \quad (3)$$

因此, 求解各子过程优化设定值 $x_s^* = [x_{s1}^* \ x_{s2}^* \ \dots \ x_{sn}^*]$, 可归结为如下优化问题:

$$\min L(x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sn}) \Big|_{x_s};$$

$$\text{s t} \begin{cases} \Delta y = f(\Delta x_s), \\ \Delta x_s \in X_1, \\ x_s \in X_2 \end{cases} \quad (4)$$

各子过程的设定值变化量与最终产品质量之间的映射关系(式(1)) 通常无法得到. 本文首先利用 if-then 规则库来表示各子过程设定值变化量与最终产品质量的关系, 各子过程设定值的优化求解便归结为基于模糊 if-then 规则库约束的优化问题; 然后采用 Tsukamoto 推理方法转化为清晰的优化问题, 从而得到各子过程的优化设定值

3 基于 if-then 规则库的生产全过程优化算法

3.1 优化问题描述

最终产品质量受多个子系统设定值 x_{si} 的共同作用, 它们之间的关系很难解析表达, 但每个子系统设定值的变化量对最终产品质量的影响, 通常可用一组模糊规则来表示. 将式(1) 中的 $f(\Delta x_s)$ 用如下的 if-then 模糊规则库代替, 即

$$\{(\mathbf{R}_1(\Delta x_s), \dots, \mathbf{R}_m(\Delta x_s)) \Big|_{\Delta x_s \in X_1}\} \quad (5)$$

其中: $\Delta x_s = [\Delta x_{s1} \ \dots \ \Delta x_{sn}]$ 为各子过程设定值的变化量, 是模糊逻辑变量; $X_1 \subset \mathbb{R}^n$ 是 Δx_s 论域中的约束集. 第 i 条模糊规则的形式为

$$\mathbf{R}_i(x_s): \text{if } \Delta x_{s1} \text{ is } \tilde{A}_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } \Delta x_{sn} \text{ is } \tilde{A}_{in} \\ \text{then } \Delta y \text{ is } \tilde{C}_i \quad (6)$$

其中: Δy 是最终产品质量偏差, \tilde{A}_{ij} 和 \tilde{C}_i 是模糊集合, \tilde{A}_{ij} 和 \tilde{C}_i 表示大、中、小等语言变量. 这样的规则可从生产实践中总结得出. 于是, 生产全过程的优化问题可描述为如下的模糊优化问题:

$$\min L(x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sn}); \\ \text{s t} \begin{cases} \{(\mathbf{R}_1(\Delta x_s), \dots, \mathbf{R}_m(\Delta x_s)) \Big|_{\Delta x_s \in X_1}\}, \\ x_s = x^0 + \Delta x_s, \\ x_s \in X_2 \end{cases} \quad (7)$$

其中 x^0 为优化前各子过程的设定值. 为求得在各子过程清晰设定值变化量 $\Delta x_s = [\Delta x_{s1} \ \dots \ \Delta x_{sn}]$ 下的最终产品质量清晰值, 利用 Tsukamoto 模糊推理方法, 将模糊优化问题转化为清晰优化问题

3.2 Tsukamoto 模糊推理方法

考虑如下模糊推理系统:

$$\mathbf{R}_1: \text{if } \Delta x_{s1} \text{ is } \tilde{A}_{11} \text{ and } \dots \text{ and } \Delta x_{sn} \text{ is } \tilde{A}_{1n} \\ \text{then } \Delta y \text{ is } \tilde{C}_1,$$

⋮

$$\mathbf{R}_m: \text{if } \Delta x_{s1} \text{ is } \tilde{A}_{m1} \text{ and } \dots \text{ and } \Delta x_{sn} \text{ is } \tilde{A}_{mn} \\ \text{then } \Delta y \text{ is } \tilde{C}_m;$$

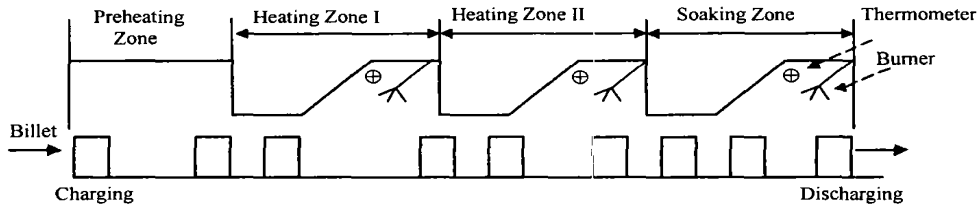


图 2 分段步进式加热炉

input: Δx_{s1} and ... and Δx_{sm} ,
 output: Δy_0 (8)

假设规则库后件的隶属度函数 C_i 是严格单调的, 为求得在清晰输入向量 $\Delta x_s = \{\Delta x_{s1}, \dots, \Delta x_{sm}\}$ 下的清晰输出值 Δy_0 , 需要进行如下求解: 首先计算每条规则的适用度

$$\alpha = T(\mu_{A_{i1}}(\Delta x_{s1}), \dots, \mu_{A_{im}}(\Delta x_{sm})),$$

$$i = 1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

其中: $T(\bullet)$ 表示模糊合成运算, 这里采用乘积运算; $\mu_{A_{i1}}(\Delta x_{s1}), \dots, \mu_{A_{im}}(\Delta x_{sm})$ 为对应于清晰输入的各隶属度值. 然后利用后件隶属度函数的单调性及方程 $\alpha = C_i(\Delta y_i)$, 求得每条规则的清晰输出值

$$\Delta y_i = C_i^{-1}(\alpha), i = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

整个模糊系统的清晰输出是每条规则清晰输出值的加权平均, 每条规则的权重就是适用度 α . 于是有

$$\Delta y_0 = \frac{\alpha_1 y_1 + \dots + \alpha_m y_m}{\alpha_1 + \dots + \alpha_m} =$$

$$\frac{\alpha_1 C_1^{-1}(\alpha_1) + \dots + \alpha_m C_m^{-1}(\alpha_m)}{\alpha_1 + \dots + \alpha_m}. \quad (11)$$

3.3 优化算法

对于生产全过程优化问题(7), 为得到各子过程的优化设定值, 首先利用 if-then 规则库(5)及 Tsukamoto 模糊推理方法, 求得在各子过程清晰设定值变化量 $\Delta x_s = \{\Delta x_{s1}, \dots, \Delta x_{sm}\}$ 下, 最终产品质量的清晰值表达式 $f(\Delta x_s)$, 即

$$\Delta y \triangleq f(\Delta x_s) =$$

$$\frac{\alpha_1 C_1^{-1}(\alpha_1) + \dots + \alpha_m C_m^{-1}(\alpha_m)}{\alpha_1 + \dots + \alpha_m}. \quad (12)$$

其中 α 是第 i 条规则的适用度, 可利用式(9)求得. 这时, 已知最终产品质量偏差 Δy , 模糊约束(5)转化为清晰约束(12), 模糊优化问题(7)转化为如下的清晰优化问题:

$$\begin{aligned} & \text{m in } L(x_{s1}, x_{s2}, \dots, x_{sm}); \\ & \text{s t } \begin{cases} f(\Delta x_s) = \Delta y, \\ \Delta x_s = X_1, \\ x_s = (x^0 + \Delta x_s) = X_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

这是一个标准的非线性数学规划问题, 可求得式

(13) 的最优解, 从而得到各子过程的优化设定值. 优化计算是实时动态进行的, 以适应生产工况的变化. 每隔一段时间, 利用检测到的系统信息进行一次滚动优化计算, 得到各子过程的优化设定值.

4 步进式加热炉炉温优化设定仿真

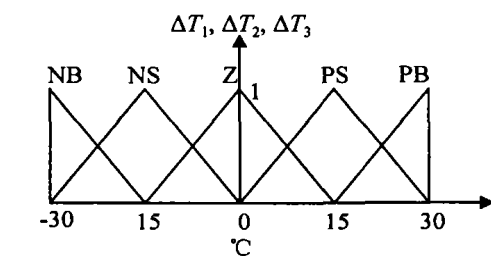
考虑一个由预热段、加热 I 段、加热 II 段、均热段组成的步进式加热炉, 如图 2 所示. 预热段不安装燃料喷嘴, 为简化问题, 研究在生产节奏平稳情况下, 加热 I 段、加热 II 段、均热段的炉温优化设定问题, 使得最终出炉钢坯的平均温度与期望值的偏差最小, 并使各加热段燃料消耗最小. 在实际步进式加热炉控制中, 一般是根据轧制节奏调节加热炉的温度设定, 达到轧机的要求. 本文在一定的轧制节奏下, 利用偏差值和模糊 if-then 规则库将各段炉温变化量转化为约束条件, 进行优化求解. 当生产条件变化时, 根据不同的轧制节奏建立不同的规则库, 再应用本文算法适应条件的变化.

加热炉有效长度为 29 348 mm, 具体参数见文献[2]. 以规格为 240 × 240 × 3 500(mm), 钢号为 C40 的钢坯加热为例进行仿真. 假设钢坯出炉间隔为 90 s, 全炉加热时间为 1.7 h, 期望的钢坯出炉平均温度为 1 110, 加热 I 段、加热 II 段、均热段的炉温设定值分别为 T_1, T_2, T_3 . 首先利用在长期生产中积累的数据, 建立炉温优化设定的模糊 if-then 规则库, 该规则库由 30 条规则组成. 模糊规则的前件是在工作点上 3 个加热段的炉温设定值变化量, 后件是钢坯出炉平均温度与期望平均温度的偏差. 各逻辑变量的模糊划分如图 3 所示. 其中: $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ 分别为 3 个加热段炉温设定值的变化量, E 为钢坯出炉平均温度偏差.

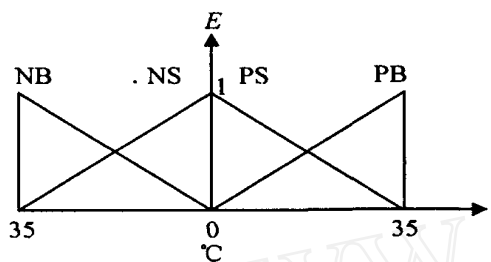
加热炉最小能耗控制一般是受约束的能耗极小化问题, 通常以炉温极小化为间接命题, 以使问题便于处理. 取性能指标

$$J = \sum_{i=1}^3 R_i T_i^2, i = 1, 2, 3,$$

其中 R_i 为各段炉温设定值的权值. 从节省能耗的角度出发, 要求 $R_1 < R_2 < R_3$, 各段炉温设定值和炉温



(a) 炉温设定值变化量



(b) 平均温度偏差

图3 各逻辑变量的模糊划分

设定值变化量应满足工艺上的约束条件

设优化前加热 I 段、加热 II 段、均热段的炉温设定值分别为 1 085 , 1 137 , 1 127 . 在此炉温设定值下, 钢坯的出炉平均温度为 1 090 , 比期望值 1 110 低 20 . 优化后各段炉温设定值分别为

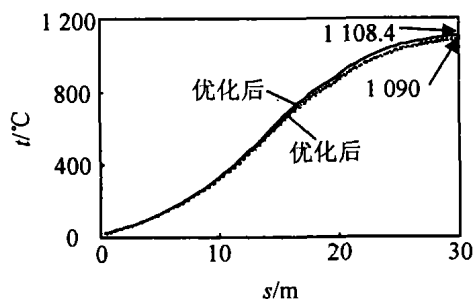


图4 钢坯全炉升温曲线

1 103 , 1 155 , 1 140 , 钢坯出炉平均温度为 1 108.4 , 满足工艺要求

利用文献[2]的钢温预报模型, 假设钢坯进炉初始温度为 20 . 在两组炉温设定值下, 钢坯的全炉加热曲线(平均温度)如图4所示

5 结 论

本文研究基于模糊 if-then 规则库的一类串联生产全过程的优化设定问题. 利用模糊 if-then 规则库来描述各子过程设定值变化量与最终产品质量的关系, 并采用 Tsukamoto 模糊推理方法将模糊优化问题转化为清晰的优化问题, 从而得到各子过程优化设定值. 以步进式加热炉的炉温设定为例进行仿真, 验证了在求得的优化炉温设定值下, 出炉钢坯的平均温度可以满足要求

参考文献(References):

- [1] George Stephanopoulos, Christine Ng Perspectives on the synthesis of plant-wide control structures[J] *J of Process Control*, 2000, 10(2): 97-111.
- [2] Zhongjie Wang, Tianyou Chai, Shouping Guan, et al Hybrid optimization set point strategy for slab furnace temperature [A] *Proc of the American Control Conf* [C]. San Diego, 1999. 4082-4086
- [3] 柴天佑, 王中杰, 张莉 加热炉的炉温优化设定模型[J]. 自动化学报, 2000, 26(4): 537-541.
(Chai Tianyou, Wang Zhongjie, Zhang Li Optimal setting of reheating furnace temperature[J] *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(4): 537-541.)
- [4] Carlsson Christer, Robert Fuller Optimization under fuzzy if-then rules[J] *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 119(1): 111-120
- [5] Jian-jun Lu, Shu-cheng Fang Solving nonlinear optimization problems with fuzzy relation equation constraints[J] *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 119(1): 1-20

下 期 要 目

一类拥塞问题研究综述	尚丽辉, 汪小帆
模糊 CLOPE 算法及其参数优选	李 洁, 等
基于指尖力传感器的 HIT 机器人灵巧手笛卡尔阻抗控制	杨 磊, 等
基于集结策略的非线性稳定预测控制器	刘 斌, 席裕庚
基于互信息和 Beam 搜索的粗糙集属性约简算法	杨 胜, 等
利用模糊次梯度算法求解拉格朗日松弛对偶问题	周 威, 金以慧
变权决策中变权效果分析与状态变权向量的确定	李德清, 李洪兴