

文章编号: 1001-0920(2001)01-0058-04

# 具有模糊参数的大工业过程的关联预测法

顾佳晨, 万百五

(西安交通大学 系统工程研究所, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对模型-实际差异问题, 提出了基于模糊模型的大工业过程稳态关联预测协调法。研究了关联预测协调法的两种情形: 开环的关联预测协调法和有全局反馈的关联预测协调法。仿真结果表明, 该算法收敛更快, 目标函数更好, 并且在线迭代次数有一定程度的减少。

**关键词:** 模糊数; 模糊规划; 大工业过程; 关联预测协调法

中图分类号: TP 273      文献标识码: A

## Interaction Prediction Method for Large-scale Industrial Processes with Fuzzy Parameters

GU Jia-chen, WAN Bai-wu

(Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on model-reality difference, the model coefficients of large-scale industrial processes are treated as fuzzy numbers. An interaction prediction method of coordination based on fuzzy model is proposed. The interaction prediction method and the method with global feedback are also studied. Simulation result shows that the proposed methods provide faster convergence and better objective function than that provided by corresponding crisp methods.

**Key words:** fuzzy numbers; fuzzy programming; large-scale industrial processes; interaction prediction method

### 1 引言

大工业过程是指石油、化工、轻工等由多个子过程组成的连续生产过程。由于它具有复杂性和持续性的生产特点, 又存在环境变化、触媒老化、原料成份变动等慢扰动, 使得模型与实际过程之间存在着差异。对于稳态大工业过程而言, 它的许多参数都具有模糊性, 如全局目标函数的成本系数、模型中的各项系数等。在这种情况下, 用模糊数学的方法描述和处理含有模糊参数的稳态大工业过程的递阶控制问

题, 将更切合实际。

Findeisen 等为了解决模型-实际差异的问题, 提出了利用实际过程的信息来修正基于模型的最优解, 但这会对实际过程造成较大的扰动<sup>[1]</sup>。涂序彦等提出的多级模糊控制方法<sup>[2]</sup>, 在低级局部单元采用基于人工操作经验的模糊 if-then 规则的模糊控制器, 上级则采用全局模糊协调器。由于子过程的数学模型是由 if-then 规则描述的, 因此该方法的局部决策单元已不是优化控制, 而只是一般的模糊控制。李龙洙等研究了目标函数和全局约束条件中存在模糊

收稿日期: 2000-03-13; 修回日期: 2000-09-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(59937150)

作者简介: 顾佳晨(1970—), 男, 上海青浦人, 博士生, 从事大系统智能优化的研究; 万百五(1928—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 从事大系统智能控制和优化的研究。

参数的大工业过程稳态优化问题<sup>[3]</sup>, 但这些因素只涉及到上层优化问题, 而下层的优化控制和决策问题仍是确定性优化问题。

本文将模糊数的概念引入大工业过程子过程的数学模型, 将模型中的各项系数处理为模糊数, 使确定模型变为模糊模型, 提出了具有模糊系数的关联预测协调法。实际仿真示例表明了该方法的有效性。它在开环情形下, 能得到与带反馈的确定性系数方法同样好的目标函数值; 在在线情况下, 能以更少的迭代次数, 得到更好的性能指标。当模型与实际过程差异较大时, 该方法更能体现出其优越性。

## 2 具有模糊系数的稳态大工业过程开环关联预测协调法

### 2.1 算法描述

关联预测协调法是大工业过程稳态优化问题的基本解法之一<sup>[1]</sup>。考虑到模型 - 实际差异, 本文把模糊数的概念引入各子过程的数学模型, 将子过程的数学模型中的各项系数取为模糊数, 子过程的数学模型变为模糊模型, 从而形成具有模糊系数的关联预测协调法。其局部决策单元的任务是: 对于协调器给定的  $y \in Y$ , 求解  $\hat{c}_i(y)$ , 使得

$$\text{FLP}_{i, 1, N} \begin{cases} c_i(y) = \arg \min Q_i(c_i, H_i, y, y_i) \\ \text{s. t. } y_i - \tilde{F}_i(c_i, H_i, y, \tilde{a}_i) \leq \tilde{0} \\ g_{ij}(c_i, H_i, y, y_i) = 0, \quad j = 1, \dots, J_i \end{cases} \quad (1)$$

协调器的任务是: 求解协调变量  $y \in Y$ , 使得

$$\text{CP: } \begin{cases} \sum_{i=1}^N Q_i(\hat{c}_i(y), H_i, \hat{y}, \hat{y}_i - i) = \\ \min_{y \in Y} \sum_{i=1}^N Q_i(\hat{c}_i(y), H_i, y, y_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $H_i, y_i$  和  $c_i$  分别为子过程的输入、输出和控制向量, 它们都是确定性变量;  $H_i$  是第  $i$  个子系统的关联矩阵;  $y_i - \tilde{F}_i(c_i, H_i, y, \tilde{a}_i) \leq \tilde{0}$  表示子过程  $i$  的系数经模糊化处理形成的模糊模型;  $g_{ij}(c_i, u_i, y_i) = 0$  为各子过程的约束式;  $Q_i(C_i, H_i, y, y_i)$  为第  $i$  个子过程的目标函数;  $Y \triangleq \{y \in \mathcal{R}^N | C_i(y) \neq \emptyset, i = 1, 2, \dots, N\}$ , 其中  $C_i(y)$  表示各子过程的解集合, 即

$$C_i(y) \triangleq \{c_i \in \mathcal{R}^n | y_i - \tilde{F}_i(c_i, H_i, y, \tilde{a}_i) \leq \tilde{0}, g_{ij}(c_i, H_i, y, y_i) = 0\} \quad (3)$$

在 (FLP <sub>$i$</sub> ) 中, 模糊模型右边的  $\tilde{F}_i(c_i, H_i, y, \tilde{a}_i)$  可表示为

$$\tilde{F}_i = \tilde{a}_{i1} \otimes c_{i1} \oplus \dots \oplus \tilde{a}_{ip} \otimes c_{ip} \oplus \dots \oplus$$

$$\tilde{a}_{ip+1} \otimes h_{i1} y \oplus \dots \oplus \tilde{a}_{ip+n_i} \otimes h_{in_i} y \quad (4)$$

其中,  $\tilde{a}_i = (\tilde{a}_{i1}, \tilde{a}_{i2}, \dots, \tilde{a}_{ip+1}, \dots, \tilde{a}_{ip+n_i})$  为模型中的模糊系数, 均取为 L-R 模糊数, 其重心所对应的横坐标值为原模型中各对应项的系数值;  $n_i$  为子过程  $i$  的关联输出维数;  $h_{ij}$  表示  $H_i$  的  $n$  个元素值,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $\otimes$  和  $\oplus$  分别表示基于扩张原理的模糊数的数量积和加法运算。

在式 (3) 中  $y_i$  为确定数, 作为模糊数的一种特例(可看作模糊单点集), 它可与模糊数进行运算。经模糊数的四则运算后,  $y_i - \tilde{F}_i(c_i, H_i, y, \tilde{a}_i)$  仍为 L-R 型模糊数(这里的减号应作为模糊减法处理), 其隶属函数可表示为  $\mu_i(F(x_i))$ , 其中  $x_i = (c_i, H_i, y, y_i)$  是确定性的决策变量。式 (3) 中的  $\tilde{0}$  表示模糊零, 其隶属函数可表示为  $\Psi(F(x_i))$ ;  $\tilde{c}$  表示  $\mu_i(F(x_i))$  的取值在  $\Psi(F(x_i))$  所定义的模糊数允许范围内。

于是, 上述的局部决策单元的任务便转变为解具有模糊约束的模糊数学规划问题。

### 2.2 局部决策单元模糊优化问题的解法<sup>[4]</sup>

定义 1 决策向量  $x_i$  对第  $i$  个模糊模型的满足度函数为

$$M_i(x_i) \triangleq \int_{\mu_i(F) \leq \Psi(F)} \mu_i(F) \Psi(F) dF \Big/ \int_{\mu_i(F) \leq \Psi(F)} \mu_i(F) dF \quad (5)$$

当  $\mu_i(F)$  完全被  $\Psi(F) = 1$  区间覆盖时, 如图 1(a) 所示,  $M_i(x_i) = 1$ ; 当  $\mu_i(F)$  完全在  $\Psi(F)$  之外时, 如图 1(b) 所示,  $M_i(x_i) = 0$ 。

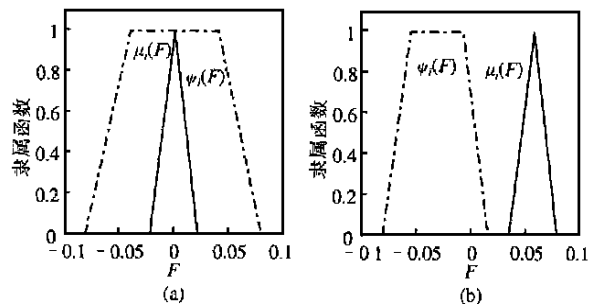


图 1 满足度函数示意图

(a)  $\mu_i(F)$  在  $\Psi(F) = 1$  区间 (b)  $\mu_i(F)$  在  $\Psi(F)$  之外  
定义在  $N$  维欧氏空间上的模糊模型  $y_i - \tilde{F}_i(c_i, H_i, y, \tilde{a}_i) \leq \tilde{0}$ , 由其满足度函数

$$M_i(x_i): \mathcal{R}^N \rightarrow [0, 1], \quad x_i \in \mathcal{R}^N \quad (6)$$

唯一确定。由此, 模糊模型  $y_i - \tilde{F}_i(c_i, H_i, y, \tilde{a}_i) \leq \tilde{0}$  的含义, 就是在各种不同满足度意义下的  $\mu_i(F(x_i))$  属于  $\Psi(F(x_i))$ 。

定义模糊模型的  $\alpha$  水平截集为

$$\Omega_\alpha = \{x_i | M_i(x_i) \geq \alpha, x_i \in R^N\} \quad (7)$$

它们是  $R^N$  上的非模糊集。显然有

$$\alpha_1 \geq \alpha_2 \Rightarrow \Omega_{\alpha_1} \supseteq \Omega_{\alpha_2} \quad (8)$$

于是, FLP<sub>i</sub> 问题可转化为如下问题: 对于协调器给定的  $y$  求解  $c_i(y)$ , 使得

$$\text{LP}_{i, \frac{1}{1, N}} \begin{cases} c_i(y) = \arg \min Q_i(c_i, H_i y, y_i) \\ \text{s.t. } M_i(c_i, H_i y, y_i) \geq \alpha \\ g_j(c_i, H_i y, y_i) \leq 0, \quad j = \overline{1, J_i} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\alpha$  为所有模糊模型满足度的下确界。

对给定的水平  $\alpha$  式(9) 可用普通的优化方法求解。由上式可见, 决策变量是  $c_i$ , 求出的  $c_i$  和  $Q_i$  送到上层协调单元。需要指出的是, 当模型是确定性系数时, 协调器的算法有两种选择<sup>[1]</sup>: 一种是用直接的优化算法; 另一种是用罚函数法。前者算法结构简单, 但在实际计算过程中确定协调变量  $y$  的可行集合  $Y$  较难; 后者算法复杂, 精度也不如前者, 但可省去确定集合  $Y$  的麻烦。在解具有模糊系数的协调器问题时, 应采用直接优化算法, 因为模型已变为模糊模型。

### 2.3 仿真研究

考虑如下大工业过程<sup>[1]</sup>, 系统如图 2 所示。它由 3 个相互关联的子过程组成, 模型与实际过程的方程分别为

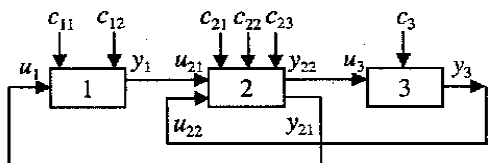


图 2 仿真实例系统结构

$$\begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{21} \\ y_{22} \\ y_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}(c_1, u_1) \\ F_{21}(c_2, u_2) \\ F_{22}(c_2, u_2) \\ F_{31}(c_3, u_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4375c_{11} - 0.1875c_{12} + 1.75u_{11} - 0.6872 \\ c_{21} - c_{22} + u_{21} - 3u_{22} \\ 2c_{22} - c_{23} - u_{21} + u_{22} \\ 1.25c_{31} - 3.75u_{31} - 0.125 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{11}^* \\ y_{21}^* \\ y_{22}^* \\ y_{31}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^*(c_1, u_1^*) \\ F_{21}^*(c_2, u_2^*) \\ F_{22}^*(c_2, u_2^*) \\ F_{31}^*(c_3, u_3^*) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} c_{11} - c_{12} + 2u_{11}^* - 0.5c_{11}^* + 0.5(c_{11} + c_{12} - 2)u_{11}^* \\ c_{21} - c_{22} + u_{21}^* - 3u_{22}^* \\ 2c_{22} - c_{23} - u_{21}^* + u_{22}^* \\ c_{31} - 4u_{31}^* - 0.5c_{31}u_{31}^* \end{bmatrix}$$

式中带 \* 号者表示实际过程量, 并且

$$\begin{aligned} c_1 &= (c_{11}, c_{21}), \quad c_2 = (c_{21}, c_{22}, c_{23}), \quad c_3 = c_{31} \\ u^1 &= u^{11}, \quad u^2 = (u_{21}, u_{22}), \quad u^3 = u_{31} \\ y^1 &= y_{11}, \quad y^2 = (y_{21}, y_{22}), \quad y^3 = y_{31} \end{aligned}$$

各子过程的性能指标为

$$\begin{aligned} Q_1(c_1, u_1) &= (u_{11} - 1)^2 + c_{11}^2 + (c_{12} - 2)^2 \\ Q_2(c_2, u_2) &= 2(c_{21} - 2)^2 + c_{22}^2 + 4u_{21}^2 + u_{22}^2 + 3c_{23}^2 \\ Q_3(c_3, u_3) &= (c_{31} + 1)^2 + (u_{31} - 1)^2 \end{aligned}$$

过程约束为

$$\begin{aligned} CUY_1 &\triangleq \{(c_1, u_1) | c_{11} + u_{11} - 1.006 \leq 0\} \\ CUY_2 &\triangleq \{(c_2, u_2) | c_2 \in R^3, u_2 \in R^2\} \\ CUY_3 &\triangleq \{(c_3, u_3) | -c_{31} - u_{31} - 0.5 \leq 0\} \end{aligned}$$

关联耦合方程为

$$\begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ u_{22} \\ u_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{21} \\ y_{22} \\ y_{31} \end{bmatrix}$$

其实际过程是非线性的, 并与模型有一定的差异。

确定性系数的关联预测协调法和模糊系数的关联预测协调法的仿真结果如表 1 所示。由表中数据可见, 用本文方法得到的实际系统目标函数值明显小于确定性系数方法, 但迭代次数(指协调器调用子过程的次数)略有增加。不过对于离线情况, 迭代次数的增加并不会对实际过程产生影响。

表 1 开环关联预测协调法

方 法	模型目 标函数	实际目 标函数	迭代 次数	收敛 标准	约束 条件
确定系数	2.483 3	2.408 5	62	10 <sup>-4</sup>	全部满足
模糊系数( $\alpha = 1$ )	2.423 9	2.308 3	84	10 <sup>-4</sup>	全部满足

在实际计算过程中,  $\mu_i(F)$  和  $\psi(F)$  宽度的取值对仿真结果有较大的影响。 $\mu_i(F)$  的宽度取决于模糊模型中模糊系数的宽度值, 而模糊系数的宽度值则反映了模型与实际差异的大小。在上例中, 其宽度小于 0.05; 若大于此值, 则迭代结果开始变坏。

对于开环情况, 通过仿真发现, 模型与实际差异越大, 采用本文的模糊模型方法效果越好(相对确定性系数方法而言), 说明本文方法在开环的关联预

测协调中是有效而可行的。

### 3 具有模糊系数的稳态大工业过程全局反馈关联预测协调法

#### 3.1 算法描述

具有模糊系数的全局反馈关联预测协调法, 依靠将实际系统关联输出反馈至协调器, 使目标函数有所改善, 其子过程的决策单元任务与开环时相同。而协调器的任务是: 找到一组协调变量  $y = (y_1, \dots, y_n)$   $Y \rightarrow Y^*$ , 使得

$$CP \begin{cases} Q(\hat{c}(y)), HK^*(\hat{c}(y)), K^*(\hat{c}(y)) \\ \min_{y \in Y} Q(c(y), HK^*(c(y)), K^*(c(y))) \\ Y^* \triangleq \{y \in Y: g_{ij}(\hat{c}(y), HK^*(\hat{c}(y)), K^*(\hat{c}(y))) = 0\} \\ i \in \overline{1, N}, j \in \overline{1, J_i} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $Y$  的定义同前,  $K^*(\hat{c}(y))$  为控制量加到实际系统后得到的实际系统输出值。

在全局反馈的关联预测算法中, 协调变量  $y$  在  $Y$  中取值, 而  $Y$  是根据模型得出的, 与实际过程会有一些的差异, 所以在迭代过程中有可能违反实际过程的约束。

#### 3.2 仿真研究

通过上节的例子来比较两种方法, 仿真结果如表 2 所示。表中数据显示出, 采用本文方法目标函数有较大的降低, 并且迭代次数和实际过程约束违反次数都有明显减少, 说明本文方法是有效的。

由于迭代过程获取了实际过程的信息, 因此在选取  $\mu_i(F)$  和  $\psi(F)$  的宽度时, 只要  $\psi(F)$  比  $\mu_i(F)$  宽, 最终的目标函数值都要好于确定性系数, 但迭代

次数和约束违反次数则要增加。

表 2 全局反馈的关联预测协调法

方 法	实际目标函数值	迭代次数	违反实际过程的约束次数	收敛标准
确定系数	2.276 0	135	12	$10^{-4}$
模糊系数( $\alpha = 1$ )	2.082 3	52	2	$10^{-4}$

## 4 结 语

本文基于对模型—实际差异的考虑, 将模糊数的概念引入子过程的模型, 得到了模糊模型, 从而提高了模型对实际系统的描述能力。 $\mu_i(F)$  和  $\psi(F)$  的宽度反映了模型—实际差异的大小, 但由于无法知道实际过程的数学描述, 所以在计算过程中  $\mu_i(F)$  和  $\psi(F)$  宽度的取值需经试凑得出。从计算结果看, 具有模糊系数大工业过程的关联预测算法比原方法收敛快、目标函数好。该方法既可用于开环的关联预测协调, 也可用于全局反馈的情形, 结果都很好, 因而具有很高的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] Findeisen W, Bailey F, Brdys M *et al.* Control and coordination in hierarchical systems[M]. London: John Wiley and Sons, 1980.
- [2] Tu Xuyan, Hu Xiaoming. Fuzzy control of large-scale systems [A]. Preprint of IFAC/IFORC Symp on Large-scale Systems Theory and Applications [C]. Warsaw, 1983. 145-150.
- [3] 万百五, 黄正良. 大工业过程计算机在线稳态优化控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 王光远, 王文泉. 具有广义模糊约束的数学规划[J]. 模糊数学, 1986, 6(1): 1-8.

(上接第 57 页)

## 4 结 论

本文讨论了离散事件系统的稳定性问题, 给出了一些重要的结论。研究方法是连续系统中广泛采用的 Lyapunov 稳定性理论应用于离散事件系统, 主要结论是证明了关于 DES 稳定性的一些函数的存在性, 而这些函数的结构性问题将是未来研究的重要方向。

#### 参考文献:

- [1] K M Passino, A N Michel, P J Antsaklis. Lyapunov stability of a class of discrete event systems[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(2): 269-279.
- [2] W Hahn. Stability of motion[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1967.
- [3] H Ye, A N Michel, L Hou. Stability theory for hybrid dynamical systems[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1998, 43(4): 461-474.