

文章编号: 1000-8152(2008)06-1032-05

大工业过程稳态优化的模糊双迭代法

张豫华^{1,2}, 万百五¹, 韩崇昭¹

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安石油大学 计算机学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 在研究大工业过程稳态优化控制算法时, 针对模型-实际存在差异, 将子过程模型作为等式约束, 通过引入模糊系数使其转化为模糊等式约束, 同时对子过程的不等式约束进行模糊化处理, 提出具有模糊不等式约束的模糊双迭代法, 通过实际例子研究了模糊双迭代法. 仿真结果表明, 模糊双迭代法目标函数非常接近实际目标函数值、算法迭代次数较精确双迭代法有明显改善. 这对实际生产非常重要.

关键词: 大工业过程; 模糊不等式约束; 模糊双迭代法; 稳态优化控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fuzzy double-iterative method for steady-state optimization of the large-scale industrial process

ZHANG Yu-hua^{1,2}, WAN Bai-wu¹, HAN Chong-zhao¹

(1.School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

2.School of Computer, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: Considering the model error of the real system, we propose a double-iterative method for steady-state optimizing control in the large-scale industrial process with fuzzy equality and inequality constraints. The sub-process models, being treated as the equality and the inequality constraints, are fuzzified by introducing to them fuzzy coefficients. The fuzzy double-iterative method is studied. Simulation results show that the solution of the proposed method is very close to the optimal solutions of the real process and provides a faster convergence than that of the exact double-iterative method.

Key words: large-scale industrial process; fuzzy inequality constrains; fuzzy double iterative method; steady-state optimizing control

1 引言(Introduction)

大工业过程是指化工、石油、轻工业等由多个子过程组成的连续的生产过程. 由于它的复杂性和持续生产的特点, 以及环境变化、触媒老化、原料成分变化等慢扰动的存在, 使得模型与实际过程之间存在差异. 因此, 它的很多参数都具有模糊性.

Findeisen^[1]等人为了了解决模型-实际差异的问题, 提出了利用实际过程信息来修正基于模型的最优解, 但这种方法会对实际过程造成较大的扰动. 涂序彦^[2]等提出了多级模糊控制的方法, 因为子过程的数学模型是由if-then规则描述的, 这种方法的局部决策单元已不是优化控制, 而是一般的模糊控制. 李龙洙^[3]等研究了目标函数和全局约束条件中存在模糊参数的大工业过程稳态优化问题. 顾佳晨^[4,5]研究了系统模型具有模糊参数的大工业过程的优化问题, 并对于下级优化问题中的不等式约束条件采用

精确系数的也进行了研究, 取得了一些重要的结果.

本文为了解决模型-实际差异的问题, 在顾佳晨^[4,5]研究工作的基础上, 将系统的不等式约束进行模糊化处理, 结合大工业过程稳态优化中的精确双迭代法, 提出了大工业过程稳态优化的模糊双迭代法.

2 模糊双迭代法(Fuzzy double iterative method)

2.1 算法描述(Description of algorithm)

双迭代法是基于全局反馈的稳态大系统工业过程的递阶优化控制方法之一^[6]. 它本质是一种双环迭代结构, 内环是离线运算即基于模型的稳态优化过程; 外环是在线运算即把离线运算所得的控制量加到实际系统, 检测到实际过程的稳态输入后, 再将其反馈到协调器. 该方法是以模型与协调器间的内环次数增加为代价, 来减少实际过程的在线迭代次

数. 它是在线迭代次数最少的协调方法.

考虑以下实际大工业过程稳态优化问题:

$$\begin{cases} \min_{c,u} Q(c, u, y), \\ \text{s.t. } y = F^*(c, u), u = Hy, G(c, u, y) \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

基于模型的优化问题可以表示如下:

$$\begin{cases} \min_{c,u} Q(c, u, y), \\ \text{s.t. } y = F(c, u), u = Hy, G(c, u, y) \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中: c, u, y 分别为系统的控制变量、关联输入变量和输出变量组成的向量, H 是关联矩阵, G 是系统的不等式约束, Q 是系统的目标函数, F^* 是系统实际过程方程, F 是系统模型方程.

对于整体优化问题, 引入参数向量 s , 偏移关联平衡条件如下:

$$u = HF(c, u) + s. \quad (3)$$

式中 $s \in \mathbb{R}$ 是由协调器设定的偏移量. 希望在 s 的某一个值上, 通过关联平衡法求解上述整体优化问题时, 使得模型关联输入 \hat{u} 与实际关联输入 $u^* = HF^*(\hat{u})$ 相等.

整体优化问题的Lagrange函数是

$$\begin{aligned} L(c, u, y, \lambda) &= \sum_{i=1}^N L_i(c_i, u_i, y_i, \lambda) = \\ &= \sum_{i=1}^N [Q_i(c_i, u_i, F_i(c_i, u_i)) + \lambda_i^T u_i - \\ &= \sum_{j=1}^N \lambda_j^T H_{ji} F_j(c_i, u_i)] \end{aligned} \quad (4)$$

因为 s 和 λ 已由协调器固定, 由式(4)可知, 局部优化问题与无偏移时一样, 其局部决策单元的任务可描述为对于协调器给定的 λ , 求出 $\hat{u}_i(\lambda)$ 和 $\hat{c}_i(\lambda)$, 使得

$$\begin{cases} (\hat{c}_i(\lambda), \hat{u}_i(\lambda)) = \operatorname{argmin} L_i(c_i, u_i, y_i, \lambda), \\ \text{s.t. } y_{ik} - F_{ik}(c_i, u_i) = 0, k = 1, 2, \dots, n_i, \\ g_{ij}(c_i, u_i, y_i) \leq 0, j = 1, 2, \dots, J_i. \end{cases} \quad (5)$$

协调器需要找到两个协调向量, 其任务可描述为: 求出 \hat{s} 和 $\hat{\lambda}(\hat{s})$, 使得

$$\begin{cases} \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s})) - HF(\hat{c}(\hat{\lambda}(\hat{s})), \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s}))) - \hat{s} = 0, \\ \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s})) = HF^*(\hat{c}(\hat{\lambda}(\hat{s})), \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s}))). \end{cases} \quad (6)$$

其中: L_i 为修正后的第 i 个子过程的目标函数; $Q_i(c_i, u_i, y_i)$ 为原目标函数; λ_i 为Larange乘子; c_i 和 u_i 分别是子过程 i 的控制向量和输入向量; y_i 是子过程 i 的输出向量; H_{ji} 是第 j 个子过程的输入向量与第 i 个子过程输入向量之间的关联矩阵; N 是大工业过程包含的子过程数; $y_{ik} - F_{ik}(c_i, u_i) = 0$ 是子过程的数学模型, 即等式约束; $g_{ij}(c_i, u_i, y_i) \leq 0$ 是子过

程的不等式约束.

考虑到实际情况下约束的模糊性, 对约束条件进行模糊处理. 由于造成约束条件中等式约束和不等式约束模糊的机理不同, 因此采用不同的模糊方法. 对于等式约束(子过程数学模型), 其模糊性主要是由模型的不精确(存在模型—实际差异)造成的, 表现为子过程数学模型中的系数不准确, 因此将等式约束中的各项系数处理为模糊数, 从而得到模糊模型. 对于不等式约束而言, 往往具有一定的伸缩性, 所以根据这个特性将整个不等式进行模糊化处理, 每个不等式约束对应一个模糊集合, 从而得到模糊双迭代法的局部决策单元任务描述.

对于式(3)进行模糊化处理, $F(c, u)$ 变为模糊形式 $\tilde{F}(c, u)$, 相应地采用下式作为偏移条件:

$$u = Hy + s. \quad (7)$$

式中 y 是关联输出向量. 在 s 的某一个值上, 通过模糊关联平衡法求解整体优化问题, 使得基于模糊模型的关联输入解 \hat{u} 与实际关联输入 u^* 相等, 其Lagrange函数只要把式(4)中的 $F_i(c_i, u_i)$ 换成 y_i 就可.

这样, 模糊双迭代法局部决策单元任务是对于协调器给定的 λ , 求出 $\hat{u}_i(\lambda)$, $\hat{c}_i(\lambda)$ 和 $\hat{y}_i(\lambda)$, 使得

$$\begin{cases} (\hat{c}_i(\lambda), \hat{u}_i(\lambda), \hat{y}_i(\lambda)) = \operatorname{argmin} L_i(c_i, u_i, y_i, \lambda), \\ \text{s.t. } y_{ik} - \tilde{F}_{ik}(c_i, u_i, \tilde{\alpha}_i) \tilde{c} \tilde{0}, k = 1, 2, \dots, n_i, \\ \tilde{g}_{ij}(c_i, u_i, y_i) \tilde{c} \tilde{0}, j = 1, 2, \dots, J_i. \end{cases} \quad (8)$$

2.2 等式约束的模糊处理(Fuzzy processing of equality constraints)

等式约束模糊方法与文献[5]类似, 去模糊后的约束式为

$$M_{ik}(c_i, u_i, y_i) \geq \alpha_1. \quad (9)$$

其中 M_{ik} 和 α_1 分别为满足度函数和满足度水平.

2.3 不等式约束的模糊处理(Fuzzy processing of inequality constraints)

不等式约束往往表示资源和安全的考虑, 模糊性表现为约束的可伸缩性, 针对这样的特点, 考虑不等号的右面项(即上界)给予一定容许违反的程度, 使得不等式约束不是严格满足, 不等号的左面保持函数关系不变^[7]. 从而将不等式约束转化为一般模糊约束

$$\tilde{g}_{ij}(c_i, u_i, y_i) \tilde{c} \tilde{0}. \quad (10)$$

式(10)对应一个模糊集, 其隶属度函数 $\mu_i(x)$ 如下:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1, & g_{ij}(x) \leq 0, \\ 1 - \frac{g_{ij}(x)}{P_i}, & 0 < g_{ij}(x) \leq 0 + P_i, \\ 0, & g_{ij}(x) > 0 + P_i. \end{cases} \quad (11)$$

其中: g_{ij} 是式(10)中的约束函数; P_i 是适当选取的常数, 它们分别表示每一个不等式约束的容许违反程度.

在选取了这个模糊集合的 α_2 水平截集后, 即把(11)转化为非模糊不等式

$$1 - \frac{g_{ij}(x)}{P_i} \geq \alpha_2 \quad (12)$$

化简后得到一个不等式

$$g_{ij}(x) \leq P_i - \alpha_2 P_i, \quad (13)$$

式(13)就是去模糊化得到的不等式约束条件.

至此, 模糊双迭代法的局部决策单元的任务可描述为: 对于协调器给定的 P_i, λ 和 α_1, α_2 求出 $\hat{u}_i(\lambda), \hat{c}_i(\lambda)$ 和 $\hat{y}_i(\lambda)$, 使得

$$\begin{cases} (\hat{c}_i(\lambda), \hat{u}_i(\lambda), \hat{y}_i(\lambda)) = \operatorname{argmin} L_i(c_i, u_i, y_i, \lambda), \\ \text{s.t. } M_{ik}(c_i, u_i, y_i) \geq \alpha_1, k = 1, 2, \dots, n_i, \\ g_{ij}(x) \leq P_i - \alpha_2 P_i, j = 1, 2, \dots, J_i \end{cases} \quad (14)$$

协调器的任务是对于给出的 α_1 和 α_2 , 求出协调变量 $\hat{\lambda}$ 和 \hat{s} 使得

$$\begin{cases} \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s})) - HF(\hat{c}(\hat{\lambda}(\hat{s})), \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s}))) - \hat{s} = 0, \\ \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s})) = HF^*(\hat{c}(\hat{\lambda}(\hat{s})), \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s}))). \end{cases} \quad (15)$$

利用模糊双迭代算法解上述问题. 首先, 固定 s 按下式更新 λ :

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \varepsilon_1 [\hat{u}(\lambda^k) - HF(\hat{c}(\lambda^k), \hat{u}(\lambda^k)) - \hat{s}]. \quad (16)$$

其中 ε_1 为步长系数, 这是内环过程. 此时偏移的关联平衡条件满足. 其次, 内环过程解得的控制量 $\hat{c}(\hat{\lambda}(\hat{s}))$ 加到实际过程上, 检测得到实际过程稳态输入 $u^* = HF^*(\hat{c}(\hat{\lambda}(\hat{s})))$, 将其反馈到协调器, 协调器以此信息加在外部迭代过程中, 利用下式更新 s :

$$s^{j+1} = s^j - \varepsilon_2 [I - HF'_u](\hat{u}(s^j) - HF^*(\hat{c}(s^j))). \quad (17)$$

式中: ε_2 为步长, F'_u 为原模型对输入 u 的导数. 当 $\hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s})) - HF^*(\hat{c}(\hat{\lambda}(\hat{s})), \hat{u}(\hat{\lambda}(\hat{s}))) = 0$ 满足时, 整个迭代过程结束.

2.4 仿真研究(Simulation)

例 1 由3个子过程组成的大工业过程:

性能指标:

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

模型方程:

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

实际过程:

$$\begin{cases} y_{11}^* = F_{11}^*(c_1, u_1^*) = c_{11} - c_{12} + 2u_{11}^* - 0.5c_{11}^* + 0.5(c_{11} + c_{12} - 2)u_{11}^*, \\ y_{21}^* = F_{21}^*(c_2, u_2^*) = c_{21} - c_{22} + u_{21}^* - 3u_{22}^*, \\ y_{22}^* = F_{22}^*(c_2, u_2^*) = 2c_{22} - c_{23} - u_{21}^* + u_{22}^*, \\ y_{31}^* = F_{31}^*(c_3, u_3^*) = 1.25c_{31} - 4u_{31}^* - 0.5c_{31}u_{31}^*. \end{cases}$$

过程约束:

$$\begin{cases} CUY_1 \triangleq \{(c_1, u_1) \mid c_{11} - 0.83 \leq 0 \cap c_{12} - 3.02 \leq 0\}, \\ CUY_2 \triangleq \{(c_2, u_2) \mid c_2 \in \mathbb{R}^3, u_2 \in \mathbb{R}^2\}, \\ CUY_3 \triangleq \{(c_3, u_3) \mid c_{31} - 0.49 \leq 0\}. \end{cases}$$

关联耦合方程:

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

系统如图1所示.

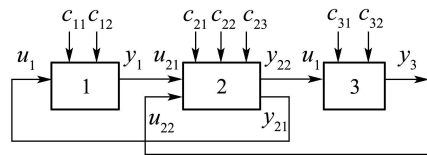


图 1 系统图

Fig. 1 System figure

例 2 由3个子过程组成的大工业过程:

性能指标:

$$\begin{cases} Q_1(c_1, u_1) = (u_{11} - 1)^4 + 5(c_{11} + c_{12} - 2)^2, \\ Q_2(c_2, u_2) = 2(c_{21} - 2)^2 + c_{22}^2 + 4u_{21}^2 + u_{22}^2 + 3c_{23}^2, \\ Q_3(c_3, u_3) = (c_{31} + 1)^2 + (u_{31} - 1)^2 + 2.5c_{32}^2. \end{cases}$$

模型方程:

$$\begin{cases} y_{11} = F_{11}(c_1, u_1) = c_{11} - c_{12} + 2u_{11}, \\ y_{21} = F_{21}(c_2, u_2) = c_{21} - c_{22} + u_{21} - 3u_{22}, \\ y_{22} = F_{22}(c_2, u_2) = 2c_{22} - c_{23} - u_{21} + u_{22}, \\ y_{31} = F_{31}(c_3, u_3) = c_{31} + 2.5u_{31} - 4u_{31}. \end{cases}$$

<p>实际过程:</p> $\begin{cases} y_{11}^* = F_{11}^*(c_1, u_1^*) = \\ \quad 1.3c_{11} - c_{12} + 2u_{11}^* + 0.15u_{11}^*c_{11}, \\ y_{21}^* = F_{21}^*(c_2, u_2^*) = \\ \quad c_{21} - c_{22} + 1.2u_{21}^* - 3u_{22}^* + 0.1c_{22}^2, \\ y_{22}^* = F_{22}^*(c_2, u_2^*) = \\ \quad 2c_{22} - 1.25c_{23} - u_{21}^* + u_{22}^* + 0.25c_{22}c_{23} + 0.1, \\ y_{31}^* = F_{31}^*(c_3, u_3^*) = 0.8c_{31} + 2.5c_{32} - 4.2u_{31}^*. \end{cases}$	<p>过程约束:</p> $\begin{cases} CUY_1 \triangleq \\ \{(c_1, u_1) \mid c_{11}^2 + c_{12}^2 \leq 1.0001 \cap 0 \leq c_{11} \leq 0.5\}, \\ CUY_2 \triangleq \{(c_2, u_2) \mid 0.5c_{21} + c_{22} + 2c_{23} \leq \\ \quad 0.3469 \cap 4c_{21}^2 + 2c_{21}u_{21} + 0.4u_{21} + \\ \quad c_{21}c_{23} + 0.5c_{23}^2 + u_{21}^2 \leq 4\}, \\ CUY_3 \triangleq \{(c_3, u_3) \mid -c_{31} - u_{31} - 0.5 \leq 0 \cap \\ \quad 0 \leq c_{32} \leq 0.3434\}. \end{cases}$
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

表 1 两种双迭代算法结果比较

Table 1 Comparison results of two double iterative methods

模型	方法	实际 目标函数	设定点 变动次数	迭代 次数	收敛 标准	约束 条件
例1	精确双迭代	1.9862	10	391	5×10^{-5}	全部满足
	模糊双迭代*	1.9854	5	1659	5×10^{-5}	全部满足
例2	精确双迭代	6.3352	9	640	5×10^{-5}	违反CUY ₁
	模糊双迭代*	6.3342	5	117	5×10^{-5}	全部满足

*例1中取 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.9, P_i = 0.1$; 例2中取 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.7, P_i = 0.1$;

例1和例2实际系统最优值(目标函数值)分别为1.9830和6.3269.

系统图与图1相同. 关联耦合方程与例1相同.

由表1中数据可以看出, 因为目标函数已经非常接近实际系统的最优值, 所以难有进一步的很明显的改善, 但仍有改善. 迭代次数(离线迭代)也有较大幅度的变化, 实际系统的设定点变动次数(在线迭代)也显著减少. 表1个别出现违反约束的情况, 这与对不等式约束的上界发生变化有关系, 实际上在建立模型时过程的不等式约束并非非常严格, 而且随着时间的推移原有的约束也在变动, 但这种约束的伸缩性并不大, 所以在仿真时, 不等式约束的容许违反程度 P_i 都取得非常小. 不过从仿真结果看该方法是可行的.

3 结论(Conclusion)

考虑到模型-实际差异以及实际不等式约束条件的可伸缩性, 本文提出了具有模糊不等式约束的稳态大工业过程模糊双迭代法. 首先对不等式约束条件进行模糊化处理, 然后利用模糊集的 α -水平截集将模糊后的不等式约束条件去模糊后得到新的算法. 从仿真例子可以看出, 由具有模糊不等式约束的模糊双迭代算法得到的解已非常接近实际过程的最优解, 迭代次数、目标函数比精确双迭代算法有明显的改善. 但在目标函数已经非常接近实际系统的最优值时, 本法对目标函数的改善会受到限制. 因为本法仍是一个进一步逼近的近似算法. 同时, 在线迭代次数的显著减少, 对于

减少对优化中的稳态大工业过程的生产的扰动非常重要. 仿真表明具有模糊不等式约束的模糊双迭代法是有效的. 该算法收敛性证明, 在简单情况下已由文献[8]给出. 所以在稳态大工业过程优化控制时可以直接采用本算法.

参考文献(References):

- [1] FINDEISEN W, BAILEY F, Brdys M. *Control and Coordination in Hierarchical Systems*[M]. London: John Wiley and Sons, 1980.
- [2] TU X Y, HU X M. Fuzzy control of large-scale system[C]//*Preprint of IFAC/IFORC Symposium on Large-scale System Theory and Application*. Oxford, New York: Pergamon Press, 1994.
- [3] 李龙洙, 秦世引, 万百五. 多目标稳态递阶系统的智能化关联预估优化方法[C]//中国控制与决策学术年会论文集. 沈阳: 东北大学出版社, 1994: 987 - 991.
(LI Longzhu, QIN Shiyin, WAN Baiwu. Intelligent interaction method for multi-mbjective steady state hierarchical control systems[C]//*Proceedings of Chinese Control and Decision Conference*. Shenyang: Northeast University Press, 1994: 987 - 991.)
- [4] 顾佳晨, 万百五. 具有模糊参数的大工业过程的关联预测法[J]. 控制与决策, 2001, 16(1): 58 - 61.
(GU Jiachen, WAN Baiwu. Interaction prediction method for large-scale industrial processes with fuzzy constraints[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(1): 58 - 61.)
- [5] 顾佳晨, 万百五. 具有模糊约束的大工业过程的关联平衡法[J]. 控制与决策, 2001, 16(Suppl): 661 - 664.
(GU Jiachen, WAN Baiwu. Interaction balance method for large-scale industrial processes with fuzzy constraints[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(Suppl): 661 - 664.)
- [6] SHAO F Q, ROBERTS P D. A price correction mechanism with global feedback for hierarchical control of steady-state systems[J]. *Large Scale System*, 1983, 4: 67 - 80.

- [7] 李洪兴, 汪群, 段钦治. 工程模糊数学方法及应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1991.
- [8] 顾佳晨, 万百五. 基于模糊模型的大系统关联平衡法的收敛性[J]. 自动化学报, 2004, 30(2): 207 – 213.
(GU Jiachen, WAN Baiwu. Convergence of interaction balance method based on fuzzy model for large scale systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(2): 207 – 213.)

作者简介:

张豫华 (1965—), 男, 讲师, 博士研究生, 目前研究方向为大系统智能优化研究、人工智能和算法设计, E-mail: yhzhang@pub.xaonline.com;

万百五 (1928—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为大系统智能控制和优化研究, E-mail: wanbw@mail.xjtu.edu.cn;

韩崇昭 (1943—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为随机控制与自适应控制、工业过程控制与优化、非线性频谱分析和决策理论与决策支持系统等, E-mail: czhan@mail.xjtu.edu.cn.

(上接第1031页)

系统的 α 阶时延逆系统, 并将该逆系统与原系统串联, 形成伪线性系统, 并引入闭环预测控制, 从而使得整个控制系统结构简单, 便于实现. 仿真结果表明, 该解耦方法可以使板形板厚系统互不干扰, 控制系统对干扰的影响很快可以克服, 且动态性能良好, 说明控制系统具有较强的抗干扰能力. 此方法为板形板厚综合系统的有效控制提供了一种新方法、新途径.

参考文献(References):

- [1] SBARBARO D, HUNT K J, GAWTHROP P J. An artificial neural network for milling application[J]. *Steel Times*, 1995, 223(4): 137 – 138.
- [2] PLICHLER R, PFAFFERMAYER M. On-line optimization of the rolling process—a case of neural networks[J]. *Steel Times*, 1996, 224(9): 310 – 311.
- [3] DAI X Z, LUI J, FENG C, et al. MIMO system invertibility and decoupling control strategies based on ANN α th order inversion[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2001, 148(2): 125 – 136.
- [4] 孙炜, 翟晓华, 张路金, 等. 一种自组织小波神经网络定子电阻估计器[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 371 – 373, 379.
(SUN Wei, ZHAI Xiaohua, ZHANG Lujin, et al. Stator resistance estimator based on self-organization wavelet neural network[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 371 – 373, 379.)
- [5] ZHANG J, WALTER G G, MIAO Y B, et al. Wavelet neural networks for function learning[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(6): 1485 – 1497.
- [6] HUANG M, CUI B T. Optimization of wavelet neural networks based on structural risk minimization[J]. *Dynamics of Continuous Discrete and Impulsive Systems(Suppl S)*, 2006, 13(3): 1185 – 1188.
- [7] 徐湘元, 毛宗源. 时滞系统的神经网络预测控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(6): 932 – 934.
(XU Xiangyuan, MAO Zongyuan. The neural network predictive control of time-delay systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(6): 932 – 934.)
- [8] 戴先中, 何丹, 陈毓, 等. 一基于NN α 阶逆的非线性大时延系统预测控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 17(4): 589 – 592.
(DAI Xianzhong, HE Dan, CHEN Yu, et al. Predictive control of nonlinear large time-delay system based on NN α th-order inverse[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 17(4): 589 – 592.)

作者简介:

黄敏 (1974—), 女, 博士, 副教授, 从事小波分析、神经网络等研究, E-mail: huangmzqb@163.com;

朱启兵 (1973—), 男, 博士, 副教授, 从事小波分析、故障诊断与容错控制等研究, E-mail: zhuqib@163.com;

崔宝同 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 从事小波分析、滑动模控制等研究, E-mail: btcui@vip.sohu.com.