

具有模糊参数的大工业过程的混合协调法 *

顾佳晨, 万百五, 管晓宏

(西安交通大学 系统工程研究所 制造系统国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 在研究大工业过程的递阶优化控制算法时, 针对模型-实际差异问题, 将子过程的数学模型中的系数处理为模糊数, 提出了基于模糊模型的大工业过程的稳态混合协调算法. 研究了两种具有模糊参数的混合算法: 开环的和有全局反馈的混合协调算法. 与基于精确系数模型的混合算法相比基于模糊模型的混合算法收敛更快, 目标函数更好.

关键词: 大工业过程; 混合协调法; 模糊数

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Mixed method of coordination for large-scale industrial processes with fuzzy parameters

GU Jia-chen, WAN Bai-wu, GUAN Xiao-hong

(National Laboratory for Manufacturing System Engineering, Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The model coefficients of large-scale industrial processes are regarded as fuzzy numbers due to the model-reality difference. A new mixed method of coordination based on fuzzy model is proposed in this paper to solve the problem of model-reality difference. The mixed method and the mixed method with global feedback are studied in this paper. Simulation results show that the methods proposed in this paper provide a considerably less number of iterations and a better objective function than that provided by the methods based on crisp model.

Key words: large-scale industrial processes; mixed method; fuzzy numbers

1 引言(Introduction)

大工业过程是由多个子过程组成的连续生产过程, 由于复杂性和持续生产的特点, 只能得到近似的数学模型. 另外, 环境变化等慢扰动也使实际过程数学模型发生着缓慢的变化. 因此, 在研究大工业过程的递阶优化控制算法时, 必须要考虑到模型-实际差异的问题.

Findeisen 等人了解决模型-实际差异的问题, 提出了利用实际过程的信息来迭代修正基于模型的最优解. 由于要将基于模型的解多次迭代加到实际过程, 这种方法会对实际过程造成较大的扰动^[1]. 涂序彦等人提出了多级模糊控制的方法^[2], 基于人的操作经验, 在下级局部单元采用模糊控制器, 上级采用全局模糊协调器. 由于这种方法的数学模型是基于人的经验, 由 if-then 规则所描述, 因此它的局部决策单元任务不再是优化控制, 而是模糊控制. 李龙洙等人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^[3], 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精确参数的优化问题, 因此并没有很好地解决模型-实际差异问题.

本文用模糊数替代过程数学模型中的系数, 使各过程模型变为模糊模型, 提出有模糊系数的混合协调算法. 与基于精确系数模型的混合法相比, 迭代次数更少, 目标函数更好.

2 有模糊系数的开环混合协调算法 (Open-loop mixed method with fuzzy coefficients)

2.1 算法描述 (Algorithm description)

混合协调法是稳态大工业过程三种基本协调方法之一, 它是另外两种基本协调方法关联预测法与关联平衡法相结合的产物 (具体的算法描述较复杂, 限于篇幅不再赘述, 可参阅文献 [1] 和 [3]), 由于存在模型-实际差异, 算法只能得到次优解. 大工业过程由多个相互关联的子过程组成, 在稳态工况下其

* 基金项目: 国家自然科学基金 (59937150) 重点资助项目.

收稿日期: 2000-06-30; 收修改稿日期: 2001-05-31.

每个子过程可用下面一组代数方程描述:

$$y_{ik} = a_{ik1}c_{i1} + \cdots + a_{ikp}c_{ip} + a_{ikp+1}u_{i1} + \cdots + a_{ikp+q}u_{iq}. \quad (1)$$

式中: $k = 1, \dots, n_i$, $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{in_i}) \in \mathbb{R}^{n_i}$ 为子过程 i 的关联输出变量, n_i 为子过程 i 的维数(即输出变量数), $u_i = (u_{i1}, \dots, u_{iq}) = H_i y \in \mathbb{R}^q$ 是子过程 i 的输入变量, y 是所有子过程输出变量组成的一维列向量, H_i 是子过程 i 的关联矩阵, $c_i = (c_{i1}, \dots, c_{ip})$ 是第 i 个子过程的控制变量, $a_{ik} = (a_{ik1}, \dots, a_{ikp+q})$ 是第 i 个子过程模型中第 k 个方程的系数向量。

考虑到模型-实际差异,将 $a_{ik} = (a_{ik1}, \dots, a_{ikp+q})$ 处理为模糊数 $\tilde{a}_{ik} = (\tilde{a}_{ik1}, \dots, \tilde{a}_{ikp+q})$, 从而子过程的数学模型变为模糊模型:

$$y_{ik} - \tilde{F}_{ik}(c_i, u_i, \tilde{a}_{ik}) \tilde{\subset} \tilde{0} \quad (k = 1, \dots, n_i). \quad (2)$$

式中 $u_i = (u_{i1}, \dots, u_{iq})$, $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{in_i})$, c_i 分别为子过程的输入、输出和控制量, 它们都是精确变量. $\tilde{0}$ 表示模糊零. 其中 $\tilde{F}_{ik}(c_i, u_i, \tilde{a}_{ik})$ 是(1)式右边经模糊化后得到的表达式:

$$\tilde{F}_{ik} = \tilde{a}_{ik1} \otimes c_{i1} \oplus \cdots \oplus \tilde{a}_{ikp} \otimes c_{ip} \oplus \cdots \oplus \tilde{a}_{ikp+1} \otimes u_{i1} \oplus \cdots \oplus \tilde{a}_{ikp+q} \otimes u_{iq}. \quad (3)$$

$\tilde{a}_{ik} = (\tilde{a}_{ik1}, \dots, \tilde{a}_{ikp+q})$ 都取为 L-R 型模糊数, 其重心所对应的横坐标值为原模型中各对应项的系数值. $\otimes$ 和 $\oplus$ 分别表示基于扩张原理的模糊数的数量积与数量和运算。

本文只考虑混合协调法中输出预测平衡的情形, 此时子过程 i 的关联输入变量 u_i 是以 $H_i y$ 的形式出现, 因此在以下的表达式中均以 $H_i y$ 表示 u_i . 为导出有模糊系数的混合协调法, 必须将以上的模糊等式(2)化为非模糊式. (2)式经过模糊数的四则运算后 $y_{ik} - \tilde{F}_{ik}(c_i, H_i y, \tilde{a}_{ik})$ 仍为 L-R 型模糊数, y_{ik} 为精确数, 作为模糊数的一种特例(可看作模糊单点集), 它可以与模糊数运算(这里的减号应作为模糊减法处理), 其隶属函数可表示为 $\mu_{ik}(F(x_{ik}))$, 其中 $x_{ik} = (c_i, H_i y, y_{ik})$ 是精确的决策变量. 右边的 $\tilde{0}$ 表示模糊零, 其隶属函数表示为 $\Psi(F(x_{ik}))$. $\tilde{\subset}$ 表示 $\mu_{ik}(F(x_{ik}))$ 的取值在 $\Psi(F(x_{ik}))$ 所定义的模糊数允许范围内. 定义如下的满足度函数^[4]:

定义 1 决策向量 x_{ik} 对子过程 i 的第 k 个模糊模型的满足度函数为:

$$M_{ik}(x_{ik}) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{ik}(F) \Psi(F) dF / \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{ik}(F) dF. \quad (4)$$

当 $\mu_{ik}(F)$ 完全被 $\Psi(F)$ 的 $\Psi(F) = 1$ 区间覆盖时(如图 1(a)所示), $M_{ik}(x_{ik}) = 1$. 当 $\mu_{ik}(F)$ 完全在 $\Psi(F)$ 之外时(如图 1(b)所示), $M_{ik}(x_{ik}) = 0$.

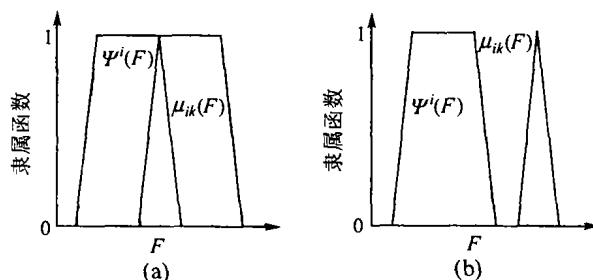


图 1 满足度函数示意图

Fig. 1 Satisficing function demonstration

定义在 n 维欧氏空间上的模糊模型 $y_{ik} - \tilde{F}_{ik}(c_i, H_i y, \tilde{a}_{ik}) \tilde{\subset} \tilde{0}$ 由其满足度函数

$$\begin{cases} M_{ik}(x_{ik}): \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1], \\ x_{ik} \rightarrow M_{ik}(x_{ik}) \end{cases} \quad (5)$$

唯一确定. 由此, 模糊模型 $y_{ik} - \tilde{F}_{ik}(c_i, H_i y, \tilde{a}_{ik}) \tilde{\subset} \tilde{0}$ 的含义就是在不同满足度意义下的 $\mu_{ik}(F(x_{ik}))$ 属于 $\Psi(F(x_{ik}))$.

定义模糊模型的 α -水平截集为:

$$\Omega_{ika} = \{x_{ik} \mid M_{ik}(x_{ik}) \geq \alpha, x_{ik} \in \mathbb{R}^n\}. \quad (6)$$

它们是 $\mathbb{R}^n$ 上的非模糊集. 显然有

$$\alpha_1 \leq \alpha_2 \Rightarrow \Omega_{ika_1} \supseteq \Omega_{ika_2}. \quad (7)$$

对于给定的 α , 模糊模型 $y_{ik} - \tilde{F}_{ik}(c_i, H_i y, \tilde{a}_{ik}) \tilde{\subset} \tilde{0}$ 可化为不等式:

$$M_{ik}(c_i, H_i y, y_{ik}) \geq \alpha. \quad (8)$$

此时, 混合协调法的局部决策单元中, 子过程的等式方程转化为不等式形式, 原来的拉格朗日函数中拉氏乘子项和罚函数项不再成立. 因此, 原来的混合协调算法无法应用, 须另加推导. 为了书写方便, 将决策变量 $(c_i, H_i y, y_{ik})$ 集中表示为 x_{ik} , 把(8)式改写为 $g_{ik}(x_{ik}) = \alpha - M_{ik}(c_i, H_i y, y_{ik}) \leq 0$. 首先, 引入松弛变量 ω_{ik} , 把不等式约束化为等式约束:

$$g_{ik}(x_{ik}) + \omega_{ik}^2 = 0.$$

重新定义拉格朗日函数如下:

$$L_i(x_i, \lambda_i, \omega_i) = Q_i(x_i) - \sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik} [g_{ik}(x_{ik}) + \omega_{ik}^2] + \rho \sum_{k=1}^{n_i} [g_{ik}(x_{ik}) + \omega_{ik}^2]^2. \quad (9)$$

式中 $Q_i(x_i)$ 表示第 i 个子过程的目标函数, n_i 为第 i 个子过程模型中的关联输出数, $g_{ik}(x_{ik})$ 表示第 k 个

方程模糊化后,得到的不等式约束, λ_{ik} 是相应于第 k 个方程的拉格朗日乘子, ρ 为罚因子.

当子过程比较复杂,包含的方程数目较多时,松弛变量较多,将使寻优变量大为增加,为减少寻优变量,进行如下推导:

(9)式关于 ω_{ik} 求导,解方程 $\nabla_{\omega} L_i(x_i, \lambda_i, \omega_i) = 0$ 得

$$2\omega_{ik}\{2\rho\omega_{ik}^2 + [-\lambda_{ik} + 2\rho g_{ik}(x_{ik})]\} = 0. \quad (10)$$

若 $-\lambda_{ik} + 2\rho g_{ik}(x_{ik}) \geq 0$, 则 $\omega_{ik}^2 = 0$. 若 $-\lambda_{ik} + 2\rho g_{ik}(x_{ik}) < 0$, 则 $\omega_{ik}^2 = -\frac{1}{2\rho}[-\lambda_{ik} + 2\rho g_{ik}(x_{ik})]$. 因此得:

$$g_{ik}(x_{ik}) + \omega_{ik}^2 = \begin{cases} g_{ik}(x_{ik}), & \text{当 } -\lambda_{ik} + 2\rho g_{ik}(x_{ik}) \geq 0, \\ \frac{\lambda_{ik}}{2\rho}, & \text{当 } -\lambda_{ik} + 2\rho g_{ik}(x_{ik}) < 0. \end{cases} \quad (11)$$

上式相当于:

$$g_{ik}(x_{ik}) + \omega_{ik}^2 = \max[g_{ik}(x_{ik}), \frac{\lambda_{ik}}{2\rho}]. \quad (12)$$

将上式代入(9)式,消去松弛变量 ω_{ik} 得:

$$L_i(x_i, \lambda_i, \omega_i) = Q_i(x_i) - \sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik} \varphi_{ik} + \rho \cdot \sum_{k=1}^{n_i} \varphi_{ik}^2. \quad (13)$$

式中 $\varphi_{ik} = \max[g_{ik}(x_{ik}), \frac{\lambda_{ik}}{2\rho}]$.

这样,采用(13)式作为第 i 个子过程局部决策单元的目标函数,得出具有模糊参数的大工业过程混合协调算法的局部决策单元的任务为:

$$(LP_i) \begin{cases} \text{对协调器给定的 } \gamma, \lambda_i \text{ 和给定的罚系数 } \rho \\ \text{求出 } \hat{c}_i(\gamma, \lambda_i), \text{ 使得} \\ \hat{c}(\gamma, \lambda_i) = \arg \min L_i(c_i, H_i \gamma, \gamma_i, \lambda_i), \\ \text{s.t. } CUY_i. \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\lambda_i = (\lambda_{i1}, \dots, \lambda_{in_i})$, $L_i(c_i, H_i \gamma, \gamma_i, \lambda_i)$ 由(13)式确定, $CUY_i \triangleq \{(c_i, H_i \gamma, \gamma_i) \mid l_{ij}(c_i, H_i \gamma, \gamma_i) \leq 0 (j = 1, \dots, J_i)\}$ 是子过程 i 的原有不等式约束. 求解局部决策问题时可用一般的有约束条件的非线性优化方法. 局部问题的解 $\hat{c}(\gamma, \lambda)$ 对于每一 (γ, λ) , $\gamma \in Y, \lambda \in \Lambda \subset \mathcal{R}$, 是唯一的. Y 是关于输出的约束集合, $\mathcal{R}$ 是有限维欧氏空间.

具有模糊参数的大工业过程混合协调算法的协调器任务为:

$$(CP) \begin{cases} \text{求出函数 } L(c, H\gamma, \gamma, \lambda) = \sum_{i=1}^N L_i(c_i, H_i \gamma, \gamma_i, \lambda_i) \\ \text{的鞍点 } (\hat{\gamma}, \hat{\lambda}) \in Y \times \Lambda, \text{ 使得} \\ \text{平衡条件 } g(\hat{c}, H\hat{\gamma}, \hat{\gamma}, \hat{\lambda}) + \omega^2 = 0 \text{ 成立.} \end{cases} \quad (15)$$

式中 $g(\hat{c}, H\hat{\gamma}, \hat{\gamma}, \hat{\lambda}) + \omega^2$ 表示由 $g_{ik}(x_{ik}) + \omega_{ik}^2$ 组成的单维列向量.

协调器的算法采用两级算法,先固定 λ , 以 γ 为优化变量用普通的非线性优化方法进行优化,求得解 $\hat{\gamma}$ 后,按下式更新 λ :

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k - 2\rho \left\{ \max \left[g(\hat{c}(\hat{\gamma}^k, \lambda^k), H\hat{\gamma}^k, \hat{\gamma}^k, \lambda^k), \frac{\lambda^k}{2\rho} \right] \right\}. \quad (16)$$

2.2 仿真(Simulation)

下面的例子取自 Findeisen 的大系统专著^[1].

考虑如下的大工业过程,由 3 个相互关联的子过程组成:

1) 子过程 1.

模型方程:

$$\gamma_{11} = F_{11}(c_1, u_1) =$$

$$1.4375c_{11} - 0.1875c_{12} + 1.75u_{11} - 0.6872.$$

实际方程:

$$\gamma_{11}^* = F_{11}^*(c_1, u_1^*) =$$

$$c_{11} - c_{12} + 2u_{11}^* - 0.5c_{11}^2 + 0.5(c_{11} + c_{12} - 2)u_{11}^*.$$

性能指标:

$$Q_1(c_1, u_1) = (u_{11} - 1)^2 + c_{11}^2 + (c_{12} + 2)^2.$$

过程约束:

$$CUI_1 \triangleq \{(c_1, u_1) \mid c_{11} + u_{11} - 1.006 \leq 0\}.$$

2) 子过程 2.

模型方程:

$$\gamma_{21} = F_{21}(c_2, u_2) = c_{21} - c_{22} + u_{21} - 3u_{22},$$

$$\gamma_{22} = F_{22}(c_2, u_2) = 2c_{22} - c_{23} - u_{21} + u_{22}.$$

实际方程:

$$\gamma_{21}^* = F_{21}^*(c_2, u_2^*) = c_{21} - c_{22} + u_{21}^* - 3u_{22}^*,$$

$$\gamma_{22}^* = F_{22}^*(c_2, u_2^*) = 2c_{22} - c_{23} - u_{21}^* + u_{22}^*.$$

性能指标:

$$Q_2(c_2, u_2) = 2(c_{21} - 2)^2 + c_{22}^2 + 4u_{21}^2 + u_{22}^2 + 3c_{23}^2,$$

过程约束:

$$CUI_2 \triangleq \{(c_2, u_2) \mid c_2 \in \mathbb{R}^3, u_2 \in \mathbb{R}^2\}.$$

3) 子过程 3.

模型方程:

$$\gamma_{31} = F_{31}(c_3, u_3) = 1.25c_{31} - 3.75u_{31} - 0.125.$$

实际方程:

$$y_{31}^* = F_{31}^*(c_3, u_3^*) = c_{31} - 4u_{31}^* - 0.5c_{31}u_{31}^*.$$

性能指标:

$$Q_3(c_3, u_3) = (c_{31} + 1)^2 + (u_{31} - 1)^2.$$

过程约束:

$$CUY_3 \triangleq \{(c_3, u_3) | -c_{31} - u_{31} - 0.5 \leq 0\}.$$

式中带有 * 号的变量表示实际过程量,可以看出模型-实际有差异.过程的关联子矩阵为:

$$H_1 = [0 \ 1 \ 0 \ 0], H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, H_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 0].$$

系统图如图 2 所示.

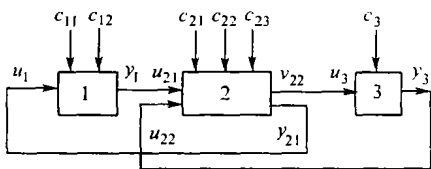


图 2 例子系统图

Fig. 2 Structure of the sample

表 1 为精确系数的混合协调法和模糊系数的混合协调法的仿真结果.

表 1 开环的混合协调法的仿真结果

Table 1 Simulation results of open-loop mixed method

方法	模型目标函数	实际目标函数	迭代次数 ^[注]	收敛标准	约束条件
精确系数模型	2.4833	2.4085	332	10 ⁻³	全部满足
模糊系数模型 ($\alpha = 1$)	2.3994	2.2606	181	10 ⁻³	全部满足

注 迭代次数是指协调器与决策单元之间总的信息交换次数,并非 λ 的更新次数.

由表中数据可以看出,有模糊系数的混合法迭代次数远少于精确系数的混合法,并且目标函数也有所降低.说明该方法在开环情况下能够较有效地对付模型-实际差异问题.

3 有模糊系数的全局反馈混合协调法 (Mixed method with fuzzy coefficients under global feedback)

3.1 算法描述(Algorithm description)

有模糊系数的全局反馈混合协调法,依靠将实际过程关联输出反馈至协调器,使目标函数有所改善,其子过程决策单元任务与开环时相同.而协调器的任务是:

$$(CP) \begin{cases} \text{求函数 } L(c, Hy^*, y^*, \lambda) = \sum_{i=1}^N L_i(c_i, H_i y^*, y_i^*, \lambda_i) \\ \text{的鞍点 } (\hat{y}^*, \hat{\lambda}) \in Y^* \times \Lambda, \text{ 使得} \\ \text{平衡条件 } g(\hat{c}, H\hat{y}^*, \hat{y}^*, \hat{\lambda}) + \omega^2 = 0 \text{ 成立.} \end{cases} \quad (17)$$

式中 Y^* 为实际过程中输出变量的约束集合. y^* 为控制量加到实际过程后得到的实际过程输出值.

在全局反馈的混合协调法中,尽管协调器是按实际目标函数进行优化的,但是各子过程的优化还是在模型的基础上进行.因此在迭代的过程中,当控制变量加到实际过程时,还是有可能违反实际过程约束,这一点在下面的仿真中可以看出.

3.2 仿真(Simulation)

仍然用上节的例子来比较两种方法,仿真结果如表 2 所示.

表 2 全局反馈的混合协调法的仿真结果

Table 2 Simulation results of mixed method with global feedback

方法	实际目标函数值	迭代次数 ^[注]	迭代中违反实际过程约束次数	收敛标准
精确系数模型	2.0904	1514	25	10 ⁻³
模糊系数模型 ($\alpha = 1$)	2.0726	673	2	10 ⁻³

注 此处的迭代次数指在线迭代次数,并非 λ 的更新次数.

表 2 显示出在全局反馈的情形中,有模糊参数的方法迭代次数比精确系数的方法大大减少,对于一个在线算法而言,这意味着对实际过程的扰动大大减少.同时也可看出该方法得到的目标函数也更小,这些都表明,在全局反馈的情况下,有模糊系数的混合法能够更有效地解决模型-实际差异问题.

4 结论(Conclusion)

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中,提出了一种新的基于模糊模型的稳态大工业过程混合协调算法.由于模糊参数是对模型不准确的一种反映,因此本文提出的方法能够比精确系数的方法更好地解决模型-实际差异问题.从计算的结果来看具有模糊系数大工业过程的混合协调算法比精确系数的方法迭代次数大大减少,目标函数也得到了改善.

参考文献(References)

- [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 Symposium on Large-Scale Systems Theory and Applications [C]. Warsaw, Poland, 1983, 145 - 150
- [3] Wan Baiwu, Huang Zhengliang. On-Line Steady State Hierarchical Optimizing Control of Large-Scale Industrial Processes [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)

(下转第 770 页)

该方法还有一些地方值得进一步改进,如怎样选择权值更加合适等.

参考文献(References)

- [1] Packard N H. Geometry from a time series [J]. Physics Review Letters, 1980, 45(9):712 - 718
- [2] Liang Z S, Wang L M. Short-term load forecast of power system based on Lyapunov exponent [J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 1998, 18(5):368 - 375 (in Chinese)
- [3] Lü J H, Zhan Y, Lu J A. The non-linear chaotic improved model of electric power system short-term load forecasting [J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2000, 20(12):80 - 83 (in Chinese)
- [4] Hagan M T, Behr S M. The time series approach to short term load forecasting [J]. IEEE Trans. on Power System, 1987, 2(3):25 - 30
- [5] Liang Z S. The Short-term load forecast of power system based on adaptive neural network [J]. J. of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1994, 14(1):27 - 35 (in Chinese)
- [6] Rahama S, Bhatnagar R. An expert system based algorithm for short term load forecast [J]. IEEE Trans. on Power System, 1988, 3(2):392 - 399
- [7] Bakirtzis A G, Theocharis J B, Kiartzis S J, et al. Short term load forecasting using fuzzy neural networks [J]. IEEE Trans. on Power System, 1995, 10(3): 1518 - 1524
- [8] Lü J H, Lu J A, Chen S H. Chaotic Time Series and Its Application [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002 (in Chinese)
- [9] Takens F. Determining strange attractors in turbulence [A]. In Lecture Notes in Mathematics, Vol. 898: Dynamical Systems and Turbulence [M]. Berlin: Springer, 1981
- [10] Lai X P, Zhou H X, Yun C X. Application of compound model neural network in short-term load forecast of power system [J]. Control Theory & Applications, 2000, 17(1):43 - 49 (in Chinese)

本文作者简介

吕金虎 1974 年生. 2002 年 6 月获中国科学院数学与系统科学研究院博士学位. 主要研究方向为混沌控制与同步, 混沌时间序列分析, 复杂系统控制. Email: lvjinh@amss.ac.cn

张锁春 1940 年生. 中国科学院应用数学研究所研究员, 博士生导师, 中国计算物理学会副理事长. 主要研究方向为计算物理, 应用数学.

(上接第 766 页)

- [4] Wang Guangyuan, Wang Wenquan. Mathematical programming with general fuzzy constraints [J]. Fuzzy Mathematics, 1986, 6(1):1 - 8 (in Chinese)

本文作者简介

顾佳晨 1970 年生. 1998 年硕士研究生毕业, 现为西安交通大学系统工程专业博士研究生. 研究领域为大系统智能优化控制.

万百五 见本刊 2002 年第 1 期第 79 页.

管晓宏 1955 年生. 1982 年和 1985 年分获清华大学工学学士和工学硕士学位, 1993 年获美国康涅狄格大学博士学位. 现任西安交通大学制造系统国家重点实验室主任, 系统工程研究所所长江特聘教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 并任 Automatica 编委. 目前研究方向包括电力市场下综合资源竞标与调度, 市场预测, 基于因特网的资源竞标以及计算机网络安全.