

基于区间数度量的运动模式建模与控制

徐正光^{1,2}, 孙昌平^{3,4}, 吴金霞^{1,2}

(1. 北京科技大学 自动化学院, 北京 100083; 2. 钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 天津理工大学 自动化学院, 天津 300384; 4. 天津理工大学 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)

摘要: 针对一类复杂的生产过程, 本文作者在前期研究成果中, 提出了基于运动模式的建模方法与控制方法的思想. 针对该方法中模式类别变量的度量问题, 本文提出采用区间数来度量模式类别变量, 进而提出了一种基于区间数度量的运动模式建模与控制方法. 首先, 采用 K 均值聚类算法对收集的足够长时间内的工况数据进行聚类, 得到 C 个模式类别, 进而构成模式刻度“空间”. 为了描述模式的运动, 本文提出了带输入的区间自回归模型(IARX). 在此基础上, 采用IARX模型建立模式类别变量的控制模型并给出了相应的控制算法. 最后, 以烧结生产过程为例验证了本文所提建模与控制方法的有效性.

关键词: 运动模式; 模式运动“空间”; 模式类别变量; 带输入的区间自回归模型; 区间时间序列; 模式识别; 建模与控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Moving pattern measured by interval number for modeling and control

XU Zheng-guang^{1,2}, SUN Chang-ping^{3,4}, WU Jin-xia^{1,2}

(1. School of Automation, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory for Advanced Control of Iron and Steel Process (Ministry of Education),
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. School of Electrical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

4. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: On the basis of our previous work on moving pattern-based modeling and control method for a class of complex production processes, we propose using the interval number as the measure of the pattern class variable, and develop a new modeling and control method of the moving pattern measured by the interval number. In this approach, using K -means clustering algorithm, the long-time collection of patterns in operating conditions is clustered into C pattern classes to build a scaled space of patterns. To describe the motion of patterns, we introduce the interval autoregressive model with exogenous input (IARX). With the IARX model, we develop the control model and the control algorithm for the pattern class variable. Practical experimental results are presented for demonstrating the validity and feasibility of the proposed approach of modeling and control.

Key words: moving pattern; pattern moving ‘space’; pattern class variable; interval ARX model; interval time series; pattern recognition; modeling and control

1 引言(Introduction)

在钢铁、冶金、建材、化工等流程工业具有一类耗能大、排污大和工艺复杂的大型生产设备, 如炼铁的高炉、炼钢的转炉、球团竖炉、烧结机以及水泥回转窑等. 从它们的动力学特性角度考虑具有一些共同的特点: 其工艺流程极其复杂, 现阶段尚不能完全解释其运动机理; 描述其工况和产品质量的参数繁多、工况的自由度难以确定; 某些物理过程在其本质上符合的是统计学运动规律(如颗粒度及其流动性等), 刻画过程工况的诸特征变量之间、以及这些特征变量与产品质量之间的对应关系不能通过确

定性的数学方程式表述, 而仅仅存在统计意义上的对应关系, 造成了其工况描述的统计性特征, 系统动力学性质主要不受牛顿力学规律支配而主要受统计规律支配^[1-3].

对于这一类系统, 目前在理论层面和实际应用层面均没有很好的动力学特性描述手段和相应的控制理论方法. 也正是这一类系统共同的统计动力学特点, 使得这一类复杂生产过程显著区别于其他一般复杂系统, 称之为非牛顿力学系统^[1-2]. 针对这一类复杂生产过程系统, 经过10年的探索与思考, 笔者初步形成了如下的研究路线: 以实际生产工况数据作

为直接驱动,采用模式识别方法作为技术手段,应用控制理论的基本原理与方法,提出了基于运动模式的动力学特性描述和相应控制方法的研究思路。

目前,模式识别方法已在过程控制中的许多领域得到了应用,如非线性系统和分布参数系统的结构识别^[4-5]、状态估计^[6]、故障诊断^[7]、自适应控制^[8]、智能控制^[9-10]等。上述模式识别在控制系统中的应用方法,并没有将模式作为一个运动的变量来考虑,也就是说没有研究不同时刻模式所属模式类别之间的内在关系,也就不能对未来时刻模式所属的模式类别进行预测,笔者称之为静态模式识别方法在控制科学中的应用。

本文作者在前期工作中^[11-13],提出了基于运动模式的建模方法与控制方法的思想。即以实际生产工况数据作为直接驱动,采用模式类别作为空间刻度,构建模式刻度空间,并定义该空间上的模式类别变量,形成模式运动空间。在模式运动空间上建立基于模式类别变量的动力学特性描述和确定相应的控制策略。本文针对该方法中模式类别变量的度量问题,提出了一种基于区间数度量的运动模式建模与控制方法。为了描述模式的运动,本文提出了带输入的区间自回归模型(interval autoregressive model with exogenous input, IARX)。在此基础上,采用IARX模型建立基于区间数度量的运动模式控制模型并给出了相应的控制算法。

本文结构安排如下:首先,给出了基于运动模式建模的思想以及本文中用到的相关区间数学的知识。其次,给出了建立基于区间数度量运动模式的控制模型的具体过程,包括:模式刻度“空间”的构造,模式类别变量的定义及其度量,区间ARX模型(IARX)的定义,基于运动模式的一类复杂生产过程的控制模型。再次,给出了一种基于区间数度量的运动模式的控制算法。最后以烧结生产过程为例验证了本文所提基于区间数度量的运动模式的建模与控制算法的有效性。

2 预备知识(Preliminary knowledge)

这里,首先介绍基于运动模式建模的思想以及本文中用到的相关的区间数学知识。

2.1 基于运动模式建模(Moving pattern based modeling)

引言中所分析的一类复杂生产过程系统,其运动规律在本质上具有统计特征。而模式类别是模式样本点的集合,该集合的所有样本都归属于同一个类别,如果用一个统一的量来表示整个类别,则这个表述类别的量就是具有统计意义上的量。如果用模式类别作为“空间”尺度,构成模式刻度“空间”,在此“空间”上定义一个描述工况模式运动(即工况模式所属类别随时间的变化)的变量——模式类别变量,则可以形成描述模式运动的“空间”——模式运

动“空间”。在此空间上应用模式类别变量,建立基于运动模式的动力学特性描述,就可以得到描述这一类复杂生产过程统计意义上的运动规律。

基于运动模式的预测建模的核心思想是通过当前及先前若干时刻工况模式所属模式类别来预测下一时刻工况模式所属的模式类别。可以将模式刻度“空间”中每一个模式类别理解为该空间的一个“刻度”,隶属相同模式类别的工况模式在模式刻度“空间”中具有相同的度量值,这样,原欧氏空间中的样本模式时间序列在模式运动“空间”中被映射为模式类别变量时间序列,进而通过模式类别变量时间序列的描述来刻画复杂生产过程的动力学特性。

2.2 模式类别变量的定义(Definition of pattern class variable)

定义1 设 $\{sx(t)\}$ 和 $\{mx(t)\}$ 分别表示检测样本序列和模式样本序列,则模式类别变量 $dx(t)$ 应满足如下变换过程:

$$mx(t) = T(sx(t)), \quad (1)$$

$$dx(t) = F(mx(t)), \quad (2)$$

这里: $T(\cdot)$ 和 $F(\cdot)$ 分别表示特征变量提取和模式分类过程, $dx(t)$ 为模式类别变量。

显然,模式类别变量 $dx(t)$ 具有以下两种属性:

- 1) 模式类别变量是时间的函数;
- 2) 模式类别变量具有类别属性。

本文把定义了模式类别变量的模式刻度“空间”称为模式运动“空间”。

2.3 区间四则运算^[14](Interval arithmetic)

区间数写成中心和半径的表达形式: $A = (a_c, a_r)$, $B = (b_c, b_r)$, 其中: a_c 和 a_r 分别为区间数 A 的中心和半径, b_c 和 b_r 分别为区间数 B 的中心和半径,

$$a_c = (a_l + a_u)/2, \quad a_r = (a_u - a_l)/2,$$

$$b_c = (b_l + b_u)/2, \quad b_r = (b_u - b_l)/2,$$

则 A 与 B 之间的加法、减法以及实数与区间数相乘运算定义为

$$A + B = (a_c + b_c, a_r + b_r), \quad (3)$$

$$A - B = (a_c - b_c, a_r + b_r), \quad (4)$$

$$\lambda \cdot A = (\lambda \cdot a_c, |\lambda| \cdot a_r), \quad (5)$$

其中 λ 为常数。区间数 $A = [a_l, a_u]$ 的上界 a_u 、下界 a_l 与区间数 $A = (a_c, a_r)$ 的中心 a_c 和半径 a_r 的关系为

$$a_u = a_c + a_r, \quad (6)$$

$$a_l = a_c - a_r. \quad (7)$$

3 基于区间数度量的运动模式建模(Moving pattern measured by interval number for modeling)

本文中,采用工况模式所属模式类别随时间的

变化来描述模式的运动, 进而刻画一类复杂生产过程的动力学特性, 因此, 需首先构造模式运动的“空间”。

3.1 基于工业现场数据的模式刻度“空间”的构造(Construction of pattern scale ‘space’ based on industrial data)

首先, 采用主成份分析方法将在足够长时间内采集的实际工况运行数据(多维工况模式样本)进行特征提取, 这里, 采用多维工况模式样本的第一主

元作为特征变量。然后, 采用K均值聚类算法, 将一维的工况模式样本聚为C类, 即: 这C个模式类别的集合构成了工况模式刻度“空间”。图1给出了由K均值聚类算法构造模式刻度“空间”的一个示意图。在模式刻度“空间”中, 每一个模式类别相当于该空间坐标轴上的一个“刻度”, 隶属于同一模式类别的工况模式在模式刻度“空间”中具有相同的“刻度”值。把定义了模式类别变量的模式刻度“空间”称为模式运动“空间”。

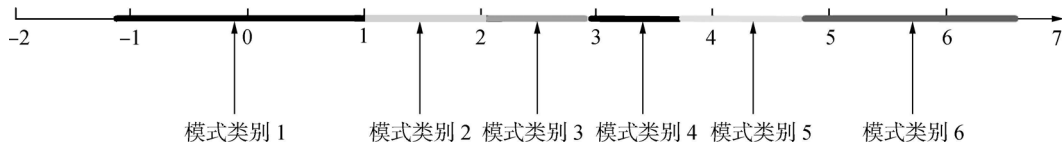


图1 模式刻度“空间”构造示意图

Fig. 1 Schema of construction of pattern scale ‘space’

3.2 模式类别的区间数表征(Interval number representation of pattern class)

在上一小节中构造的模式刻度“空间”中的各个模式类别只是定性地描述了工况模式, 为了定量的刻画模式在模式“刻度”空间中的运动, 需将模式类别定量表征。本文中, 笔者提出采用区间数来定量表征模式类别。首先, 找出隶属模式类别 P_j 的样本中的最大值 p_{\max}^j 和最小值 p_{\min}^j , 然后采用该最大值 p_{\max}^j 和最小值 p_{\min}^j 构成区间数 $[p_{\min}^j, p_{\max}^j]$, 则区间数 $[p_{\min}^j, p_{\max}^j]$ 即是模式类别 P_j 的区间数表征。

3.3 模式类别变量的度量(Measurement of pattern class variable)

为了定量地描述模式类别变量在模式运动“空间”中的运动, 本文提出采用区间数来度量模式类别变量。在本文中, 模式刻度“空间”中的每个模式类别为一维模式样本的集合, 因此, 该“空间”中的每个模式类别必定对应着一个区间数, 该区间数的上界和下界分别为隶属该模式类别的样本中的最大值和最小值。即在时刻 t , 模式样本 $m_x(t)$ 被划分到模式类别 $j, j \in \{1, 2, \dots, C\}$, C 为构成模式刻度“空间”的模式类别的个数, 则在 t 时刻, 模式类别变量 $dx(t)$ 在模式运动“空间”中的度量值为区间数 $[p_{\min}^j, p_{\max}^j]$, 这里 $[p_{\min}^j, p_{\max}^j]$ 为模式类别 P_j 的区间数表征。这样, 当采用模式类别作为模式刻度“空间”的刻度, 原欧氏空间中的模式样本时间序列在模式运动“空间”中被映射成了模式类别变量时间序列。

3.4 基于模式类别变量的动力学特性描述(Pattern-class-variable-based dynamics description)

在模式运动“空间”中, 基于模式类别变量的动力学特性描述可以用下式表示:

$$dx(k+1) = F(d\tilde{x}(k+1)) = F(f(dx(k), \dots, dx(k-m_y), \dots, u(k-m_u))), \quad (8)$$

式中: $dx(k)$ 代表模式类别变量, $u(k)$ 为系统的输入, $F(\cdot)$ 代表分类过程。 $d\tilde{x}(k)$ 代表基于运动模式的初步预测模型输出, $d\tilde{x}(k) = f(\cdot)$ 代表初步预测模型。

基于运动模式的一类复杂生产过程的预测模型是一个两步预测模型:

Step 1 根据实际的模式类别变量时间序列构建基于运动模式的初步预测模型 $d\tilde{x}(k) = f(\cdot)$;

Step 2 初步预测输出经过分类获得基于运动模式的预测模型的最终预测输出, 即 $dx(k+1) = F(d\tilde{x}(k+1))$ 。

3.4.1 基于模式类别变量的初步预测模型的构建(Construction of initial prediction model based on pattern class variable)

为了描述模式类别变量在模式运动“空间”中的运动, 首先定义了一个区间ARX模型(IARX)。

定义 2 给定精确数输入区间数输出样本对 $(Y(k), u(k)), k = 1, 2, \dots, n$, 其中: $Y(k)$ 为一区间数, $Y(k) = (Y_c(k), Y_r(k))$, $Y_c(k)$ 和 $Y_r(k)$ 分别是区

间数 $Y(k)$ 的中心和半径, $Y_c(k), u(k) \in \mathbb{R}$, $Y_r(k) \geq 0$, $k = 1, 2, \dots, n$, 则IARX模型定义如下:

$$Y(k) = \theta_0 + \theta_1 \cdot Y_c(k-1) + \dots + \theta_n \cdot Y_c(k-n) + \theta_{n+1} \cdot u(k-1) + \dots + \theta_{m+n} \cdot u(k-m), \quad (9)$$

其中: $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{m+n}$ 为区间参数, $\theta_i = (\theta_{ic}, \theta_{ir}), \theta_{ic}, \theta_{ir}$ 分别为区间参数 θ_i 的中心和半径, $i = 0, 1, 2, \dots, m+n$, $u(k)$ 为系统输入.

基于上述所提出的IARX模型, 基于模式类别变量的初步预测模型表述如下:

$$d\tilde{x}(k) = \theta_0 + \theta_1 \cdot dx_c(k-1) + \dots + \theta_n \cdot dx_c(k-n) + \theta_{n+1} \cdot u(k-1) + \dots + \theta_{m+n} \cdot u(k-m), \quad (10)$$

其中: $u(k)$ 为系统输入, $dx_c(k-j)$ 代表 $k-j$ 时刻模式类别变量 $dx(k-j)$ 的中心值, $j = 1, 2, \dots, n$, 即在 $k-j$ 时刻, 如果 $dx(k-j)$ 的取值为 $I_i = [I_i^L, I_i^U]$, 那么 $dx_c(k-j)$ 等于 $\frac{I_i^L + I_i^U}{2}$. $\theta_l = (\theta_{lc}, \theta_{lr})$ 为一区间参数, θ_{lc} 和 θ_{lr} 分别为区间参数 θ_l 的中心和半径, $l = 0, 1, 2, \dots, m+n$. 根据式(3)和式(5), 式(10)可以进一步写成

$$\begin{aligned} d\tilde{x}(k) = & \theta_0 + \theta_1 \cdot dx_c(k-1) + \dots + \theta_n \cdot dx_c(k-n) + \theta_{n+1} \cdot u(k-1) + \dots + \theta_{m+n} \cdot u(k-m) = \\ & (\theta_{0c}, \theta_{0r}) + (\theta_{1c}, \theta_{1r}) \cdot dx_c(k-1) + \dots + (\theta_{nc}, \theta_{nr}) \cdot dx_c(k-n) + \\ & (\theta_{(n+1)c}, \theta_{(n+1)r}) \cdot u(k-1) + \dots + (\theta_{(m+n)c}, \theta_{(m+n)r}) \cdot u(k-m) = \\ & (\theta_{0c} + \theta_{1c} \cdot dx_c(k-1) + \dots + \theta_{nc} \cdot dx_c(k-n) + \theta_{(n+1)c} \cdot u(k-1) + \dots + \theta_{(m+n)c} \cdot u(k-m), \\ & \theta_{0r} + \theta_{1r} \cdot |dx_c(k-1)| + \dots + \theta_{nr} \cdot |dx_c(k-n)| + \theta_{(n+1)r} \cdot |u(k-1)| + \dots + \theta_{(m+n)r} \cdot |u(k-m)|) = \\ & (\theta_c^T \mathbf{x}(k) + \theta_{(n+1)c} \cdot u(k-1), \theta_r^T |\mathbf{x}(k)| + \theta_{(n+1)r} |u(k-1)|), \end{aligned} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned} \theta_c &= (\theta_{0c}, \theta_{1c}, \dots, \theta_{nc}, \theta_{(n+2)c}, \dots, \theta_{(m+n)c})^T, \\ \theta_r &= (\theta_{0r}, \theta_{1r}, \dots, \theta_{nr}, \theta_{(n+2)r}, \dots, \theta_{(m+n)r})^T, \\ \mathbf{x}(k) &= (1, dx_c(k-1), \dots, dx_c(k-n), \\ & u(k-2), \dots, u(k-m))^T, \\ |\mathbf{x}(k)| &= (1, |dx_c(k-1)|, \dots, |dx_c(k-n)|, \\ & |u(k-2)|, \dots, |u(k-m)|)^T. \end{aligned}$$

3.4.2 基于初步预测模型中区间参数的辨识(Identification of interval parameters in initial prediction model)

基于运动模式的初步预测模型中的区间参数是通过使式(12)中的性能指标函数在约束条件 $\theta_{jr} \geq 0$ 下(因为区间参数的半径大于等于0)取得极小而求得, $j = 0, 1, 2, \dots, m+n$,

$$\begin{cases} \min_{\theta_c, \theta_r} J_1 = \sum_{k=1}^N [dx^L(k) - d\tilde{x}^L(k)]^2 + \sum_{k=1}^N [dx^U(k) - d\tilde{x}^U(k)]^2, \\ \text{s.t. } \theta_{jr} \geq 0, j = 0, 1, 2, \dots, m+n, \end{cases} \quad (12)$$

其中: $d\tilde{x}^U(k), d\tilde{x}^L(k)$ 分别为基于运动模式的初步预测模型输出 $d\tilde{x}(k)$ 的上界和下界, 而 $dx^U(k), dx^L(k)$ 为真实模式类别变量 $dx(k)$ 的上界和下界.

为了求解式(12)中的约束优化问题, 将式(12)进行整理, 得到与式(12)等价的二次优化问题, 进而可以采用求解二次规划的方法来求解式(12). 本文采用MATLAB中的quadprog函数来求解该二次规划问题.

定理1 式(12)中的约束最优化与式(13)中的二次规划等价.

$$\begin{cases} \min_{\theta_c, \theta_r} J_2 = E^T \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} E + E^T \begin{bmatrix} -B_1 - B_3 \\ B_2 - B_4 \end{bmatrix}, \\ \text{s.t. } \theta_{jr} \geq 0, j = 0, 1, 2, \dots, m+n, \end{cases} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_c &= (\theta_{0c}, \theta_{1c}, \dots, \theta_{(n+1)c}, \theta_{(n+2)c}, \dots, \theta_{(m+n)c})^T, \\ \tilde{\theta}_r &= (\theta_{0r}, \theta_{1r}, \dots, \theta_{nr}, \theta_{(n+1)r}, \theta_{(n+2)r}, \dots, \theta_{(m+n)r})^T, \\ H_1 &= 2 \sum_{k=1}^N \tilde{\mathbf{x}}(k) \tilde{\mathbf{x}}^T(k), H_2 = 2 \sum_{k=1}^N |\tilde{\mathbf{x}}(k)| |\tilde{\mathbf{x}}^T(k)|, \\ B_1 &= 2 \sum_{k=1}^N dx^L(k) \tilde{\mathbf{x}}(k), B_2 = 2 \sum_{k=1}^N dx^L(k) |\tilde{\mathbf{x}}(k)|, \\ B_3 &= 2 \sum_{k=1}^N dx^U(k) \tilde{\mathbf{x}}(k), B_4 = 2 \sum_{k=1}^N dx^U(k) |\tilde{\mathbf{x}}(k)|, \end{aligned}$$

$$\tilde{\mathbf{x}}(k) = (1, dx_c(k-1), dx_c(k-2), \dots, dx_c(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m))^T,$$

$$|\tilde{\mathbf{x}}(k)| = (1, |dx_c(k-1)|, |dx_c(k-2)|, \dots, |dx_c(k-n)|, |u(k-1)|, \dots, |u(k-m)|)^T.$$

证 由式(10)–(11)知

$$J_1 = \sum_{k=1}^N [dx^L(k) - d\tilde{x}^L(k)]^2 + \sum_{k=1}^N [dx^U(k) - d\tilde{x}^U(k)]^2 = \sum_{k=1}^N [dx^L(k) - (\tilde{\theta}_c^T \tilde{\mathbf{x}}(k) - \tilde{\theta}_r^T |\tilde{\mathbf{x}}(k)|)]^2 + \sum_{k=1}^N [dx^U(k) - (\tilde{\theta}_c^T \tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\theta}_r^T |\tilde{\mathbf{x}}(k)|)]^2,$$

因此

$$J_1 = \sum_{k=1}^N (dx^L(k))^2 + \sum_{k=1}^N (dx^U(k))^2 + 2\tilde{\theta}_c^T \left(\sum_{k=1}^N \tilde{\mathbf{x}}(k) \tilde{\mathbf{x}}^T(k) \right) \tilde{\theta}_c + 2\tilde{\theta}_r^T \left(\sum_{k=1}^N |\tilde{\mathbf{x}}(k)| |\tilde{\mathbf{x}}^T(k)| \right) \tilde{\theta}_r - 2 \sum_{k=1}^N dx^L(k) \tilde{\theta}_c^T \tilde{\mathbf{x}}(k) - 2 \sum_{k=1}^N dx^U(k) \tilde{\theta}_c^T \tilde{\mathbf{x}}(k) + 2 \sum_{k=1}^N dx^L(k) \tilde{\theta}_r^T |\tilde{\mathbf{x}}(k)| - 2 \sum_{k=1}^N dx^U(k) \tilde{\theta}_r^T |\tilde{\mathbf{x}}(k)|.$$

令

$$E = \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_c \\ \tilde{\theta}_r \end{bmatrix}, H_1 = 2 \sum_{k=1}^N \tilde{\mathbf{x}}(k) \tilde{\mathbf{x}}^T(k), H_2 = 2 \sum_{k=1}^N |\tilde{\mathbf{x}}(k)| |\tilde{\mathbf{x}}^T(k)|, B_1 = 2 \sum_{k=1}^N dx^L(k) \tilde{\mathbf{x}}(k), B_2 = 2 \sum_{k=1}^N dx^L(k) |\tilde{\mathbf{x}}(k)|, B_3 = 2 \sum_{k=1}^N dx^U(k) \tilde{\mathbf{x}}(k), B_4 = 2 \sum_{k=1}^N dx^U(k) |\tilde{\mathbf{x}}(k)|,$$

那么

$$J_1 = \sum_{k=1}^N (dx^L(k))^2 + \sum_{k=1}^N (dx^U(k))^2 + \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_c^T & \tilde{\theta}_r^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_c \\ \tilde{\theta}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_c^T & \tilde{\theta}_r^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -B_1 - B_3 \\ B_2 - B_4 \end{bmatrix} =$$

$$\sum_{k=1}^N (dx^L(k))^2 + \sum_{k=1}^N (dx^U(k))^2.$$

$$E^T \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} E + E^T \begin{bmatrix} -B_1 - B_3 \\ B_2 - B_4 \end{bmatrix},$$

而 $\sum_{k=1}^N (dx^L(k))^2$ 和 $\sum_{k=1}^N (dx^U(k))^2$ 为常数, 因此, 式(12)中的约束最优化等价于下面的二次规划:

$$\begin{cases} \min_{\theta_c, \theta_r} J_2 = \\ E^T \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} E + E^T \begin{bmatrix} -B_1 - B_3 \\ B_2 - B_4 \end{bmatrix}, \\ \text{s.t. } \theta_{j_r} \geq 0, j = 0, 1, 2, \dots, m+n. \end{cases}$$

证毕.

3.4.3 基于模式类别变量的最终预测模型输出(The output of final prediction model based on pattern class variable)

在得到基于运动模式的初步预测输出后, 为了得到模式在模式运动“空间”的度量值, 需将初步预测输出进行分类, 得到模式在模式运动“空间”中的度量值(具体做法是按最近邻分类原则将模式分类, 并将模式所属模式类别的区间数表征作为该模式在模式运动“空间”的度量值). 这里采用豪斯多夫距离作为两个区间数之间距离的度量. 即: 如果

$$j = \arg \min_{i=1,2,\dots,C} (D(d\tilde{x}(k), [p_{\min}^i, p_{\max}^i])),$$

C 为模式刻度“空间”中模式类别数, 则将初步预测模型的输出 $d\tilde{x}(k)$ 划分到模式类别 j , 并将 $[p_{\min}^j, p_{\max}^j]$ 作为基于运动模式的预测模型的最终输出值 $d\hat{x}(k)$, p_{\max}^j 和 p_{\min}^j 分别为隶属模式类别 j 的样本中的最大值和最小值. 这里 $D(d\tilde{x}(k), [p_{\min}^i, p_{\max}^i])$ 代表初步预测模型的输出 $d\tilde{x}(k)$ 与模式刻度“空间”中模式类别 i 的区间数表征 $[p_{\min}^i, p_{\max}^i]$ 之间的豪斯多夫距离.

在得到 k 时刻的基于运动模式的最终预测模型的区间输出 $d\hat{x}(k)$ 之后, 将区间数 $d\hat{x}(k)$ 的中心值 $d\hat{x}_c(k)$ 代入式(10)中来预测 $k+1$ 时刻的基于运动模式的初步预测模型输出 $d\tilde{x}(k+1)$, 再将 $d\tilde{x}(k+1)$ 进行分类后得到 $k+1$ 时刻的最终预测模型输出 $d\hat{x}(k+1)$, 再将 $d\hat{x}_c(k+1)$ 代入式(10)来预测 $k+2$ 时刻基于运动模式的初步预测模型输出 $d\tilde{x}(k+2)$, 以此类推, 可以得到 $k+2, k+3, \dots, k+n$ 时刻的最终预测输出.

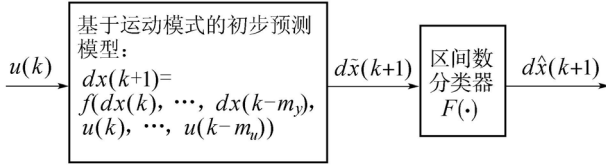


图2 基于区间数度量的运动模式建模

Fig. 2 Moving pattern measured by interval number for modeling

4 基于区间数度量的运动模式的控制 (Moving pattern measured by interval number for control)

基于前面构建的基于区间数度量的运动模式预测模型(参见式(10)), 构建以下性能指标函数来设计控制器:

$$\min_{u(k)} J = \lambda_1 [d\bar{x}_c(k+1) - d\tilde{x}_c(k+1)]^2 + \lambda_2 [d\bar{x}_r(k+1) - d\tilde{x}_r(k+1)]^2, \quad (14)$$

其中: $d\bar{x}_c(k+1)$ 代表 $k+1$ 时刻期望的模式类别变量 $d\bar{x}(k+1)$ 的中心, $d\bar{x}_r(k+1)$ 代表 $k+1$ 时刻期望的模式类别变量 $d\bar{x}(k+1)$ 的半径, λ_1, λ_2 为加权系数. 性能指标函数 J 刻画了 $k+1$ 时刻基于运动模式的初步预测模型输出 $d\hat{x}(k+1)$ 的中心 $d\tilde{x}_c(k+1)$ 和半径 $d\tilde{x}_r(k+1)$ 分别与期望的模式类别变量 $d\bar{x}(k+1)$ 的中心 $d\bar{x}_c(k+1)$ 和半径 $d\bar{x}_r(k+1)$ 误差的平方加权和. 通过使性能指标函数 J 取得最小而求得控

$$u(k) = \frac{\lambda_1 [d\bar{x}_c(k+1) - \theta_c^T \mathbf{x}(k+1)] \theta_{(n+1)c} + \lambda_2 [d\bar{x}_r(k+1) - \theta_r^T \mathbf{x}(k+1)] \theta_{(n+1)r}}{\lambda_1 \theta_{(n+1)c}^2 + \lambda_2 \theta_{(n+1)r}^2}.$$

在 $u(k) \geq 0$ 时, 令使性能指标函数 J_1 取得最小值时的 $u(k)$ 为 $u_1(k)$, 且令

$$\alpha(k) = \frac{\lambda_1 [d\bar{x}_c(k+1) - \theta_c^T \mathbf{x}(k+1)] \theta_{(n+1)c} + \lambda_2 [d\bar{x}_r(k+1) - \theta_r^T \mathbf{x}(k+1)] \theta_{(n+1)r}}{\lambda_1 \theta_{(n+1)c}^2 + \lambda_2 \theta_{(n+1)r}^2},$$

则

$$u_1(k) = \begin{cases} \alpha(k), & \alpha(k) \geq 0, \\ 0, & \alpha(k) < 0. \end{cases} \quad (16)$$

同理, 当 $u(k) < 0$ 时, 令

$$J_2 = \lambda_1 [d\bar{x}_c(k+1) - \theta_c^T \mathbf{x}(k+1) - \theta_{(n+1)c} u(k)]^2 + \lambda_2 [d\bar{x}_r(k+1) - \theta_r^T |\mathbf{x}(k+1)| + \theta_{(n+1)r} u(k)]^2.$$

令 $\frac{\partial J_2}{\partial u(k)} = 0$, 得

$$u(k) = \frac{\lambda_1 [d\bar{x}_c(k+1) - \theta_c^T \mathbf{x}(k+1)] \theta_{(n+1)c} - \lambda_2 [d\bar{x}_r(k+1) - \theta_r^T \mathbf{x}(k+1)] \theta_{(n+1)r}}{\lambda_1 \theta_{(n+1)c}^2 + \lambda_2 \theta_{(n+1)r}^2}.$$

在 $u(k) < 0$ 时, 令性能指标函数 J_2 取得最小值时的 $u(k)$ 为 $u_2(k)$, 且令

$$\beta(k) = \frac{\lambda_1 [d\bar{x}_c(k+1) - \theta_c^T \mathbf{x}(k+1)] \theta_{(n+1)c} - \lambda_2 [d\bar{x}_r(k+1) - \theta_r^T \mathbf{x}(k+1)] \theta_{(n+1)r}}{\lambda_1 \theta_{(n+1)c}^2 + \lambda_2 \theta_{(n+1)r}^2},$$

制律 $\tilde{u}(k)$. 将式(11)代入式(14)得

$$\begin{aligned} \min_{u(k)} J = & \\ & \lambda_1 [d\bar{x}_c(k+1) - \theta_c^T \mathbf{x}(k+1) - \theta_{(n+1)c} u(k)]^2 + \\ & \lambda_2 [d\bar{x}_r(k+1) - \theta_r^T |\mathbf{x}(k+1)| - \theta_{(n+1)r} |u(k)|]^2, \end{aligned} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) = & \\ & (1, dx_c(k), \dots, dx_c(k-n+1), \\ & u(k-1), \dots, u(k-m+1))^T, \\ |\mathbf{x}(k+1)| = & \\ & (1, |dx_c(k)|, \dots, |dx_c(k-n+1)|, \\ & |u(k-1)|, \dots, |u(k-m+1)|)^T. \end{aligned}$$

式(15)为一个含绝对值的非线性优化问题, 因此, 先分区域求得性能指标函数在每一区域取得最小值时的 $u(k)$, 再通过比较性能指标函数在的各个区域最小值, 得到使性能指标函数取得全局最小值时的 $u(k)$.

当 $u(k) \geq 0$ 时, 令

$$\begin{aligned} J_1 = & \\ & \lambda_1 [d\bar{x}_c(k+1) - \theta_c^T \mathbf{x}(k+1) - \theta_{(n+1)c} u(k)]^2 + \\ & \lambda_2 [d\bar{x}_r(k+1) - \theta_r^T |\mathbf{x}(k+1)| - \theta_{(n+1)r} u(k)]^2. \end{aligned}$$

令 $\frac{\partial J_1}{\partial u(k)} = 0$, 得

则

$$u_2(k) = \begin{cases} \beta(k), & \beta(k) \leq 0, \\ 0, & \beta(k) > 0. \end{cases} \quad (17)$$

因此, 使性能指标函数 J 取得全局最小值的 $\tilde{u}(k)$ 为

$$\tilde{u}(k) = \begin{cases} u_1(k), & J(u_1(k)) \leq J(u_2(k)), \\ u_2(k), & J(u_1(k)) > J(u_2(k)). \end{cases} \quad (18)$$

5 仿真研究(Simulation study)

在本仿真实验中, 以一类复杂生产过程中比较有代表性的烧结生产过程为例来验证本文所提建模和控制方法的有效性.

5.1 基于区间数度量的运动模式建模(Moving pattern measured by interval number for modeling)

5.1.1 模式刻度“空间”构造(Construction of pattern scale space)

采集了烧结生产过程的实际工况模式 $x_k = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ (即后3个风箱的废气温度) 的连续运行数据, 采样周期为 25 s. 将工况模式 $x_k = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 经过零-均值归一化后再经主成份分析降维, 得到降维后的一维工况模式 $x(k)$. 在本文仿真实验中, 第 1 主元所占有有效信息的百分比为 60.31%. 如图3所示.

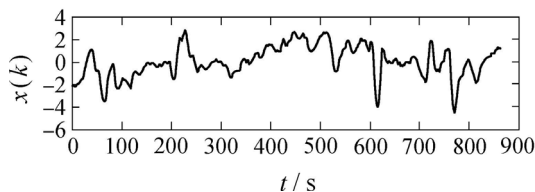


图3 经主成分分析降维后的一维工况模式时间序列 $x(k)$

Fig. 3 One dimensional operating condition pattern time series reduced by principal component analysis $x(k)$

采用 K 均值聚类算法, 将降维后的 864 组实际工况数据 $x(k)$ 聚为 C 类, 具体的模式类别数可根据实际应用来确定, 本仿真实验中 C 取为 20, 这 20 个模式类别构成了模式刻度“空间”. 表 1 列出了本实验中构成模式刻度“空间”的 20 个模式类别的区间数表征. 在构造完模式刻度“空间”后, 模式在模式运动“空间”中的运动形成了模式类别变量时间序列. 由于采用区间数度量模式类别变量, 因此, 模式类别变量 $d(x)$ 在任意时刻的取值为区间数, 模式类别变量时间序列实质上为区间时间序列.

表 1 模式刻度“空间”中模式类别的区间数表征

Table 1 Interval representation of pattern classes in the pattern scale ‘space’

P_i	$[p_{\min}^i, p_{\max}^i]$	P_i	$[p_{\min}^i, p_{\max}^i]$
1	[-4.4856, -3.8815]	11	[0.2330, 0.5212]
2	[-3.6970, -2.9504]	12	[0.5257, 0.8140]
3	[-2.7281, -1.9855]	13	[0.8200, 1.0430]
4	[-1.9612, -1.4761]	14	[1.0558, 1.2733]
5	[-1.4707, -1.0692]	15	[1.2774, 1.5243]
6	[-1.0535, -0.7335]	16	[1.5413, 1.7245]
7	[-0.7262, -0.4766]	17	[1.7445, 1.9327]
8	[-0.4681, -0.2368]	18	[1.9451, 2.1911]
9	[-0.2304, -0.0229]	19	[2.1939, 2.4154]
10	[-0.0215, 0.2212]	20	[2.4309, 2.7607]

图4中的实心方块代表工况模式时间序列, 而该图中的线段代表与该工况模式时间序列对应的模式类别变量时间序列. 在每一时刻, 线段的上下两个端点分别与该时刻的模式类别变量的度量值(区间数)的上、下边界对应.

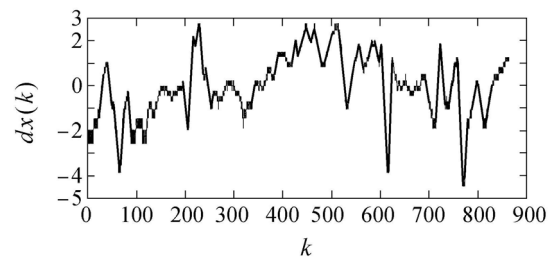


图4 模式类别变量时间序列

Fig. 4 Pattern class variable time series

通过比较图3和图4可知, 归属相同模式类别的工况模式在模式运动“空间”中具有相同的度量值, 例如, 在时刻 $k = 1 \sim 12$, 工况模式归属于相同的模式类别 P_3 , 因此, 与该时间段的工况模式相对应的模式类别变量具有相同的度量值(区间数)为 $[p_{\min}^3, p_{\max}^3] = [-2.7281, -1.9855]$ (参见表1). 在烧结生产过程中, 通过调节烧结机的点火温度为来控制烧结矿的质量. 本实验中, 采用烧结过程的点火温度作为控制系统的输入, 如图5所示.

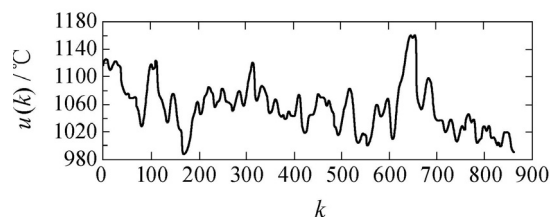


图5 点火温度 $u(k)$

Fig. 5 Ignition temperature $u(k)$

5.1.2 基于区间数度量的运动模式预测模型
(Prediction model based on moving pattern measured by interval number)

基于本文中提出的区间ARX模型, 基于运动模式的初步预测模型如式(19)所示:

$$d\tilde{x}(k) = \theta_0 + \theta_1 \cdot dx_c(k-1) + \theta_2 \cdot dx_c(k-2) + \theta_3 \cdot dx_c(k-3) + \theta_4 \cdot dx_c(k-4) + \theta_5 \cdot u(k-1), \quad (19)$$

这里: 采用前500个样本作为训练样本, 后364个样本作为测试样本. $d\tilde{x}(k)$ 为基于运动模式的初步预测模型输出, $dx_c(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻模式类别变量 $dx(k-1)$ 的中心值, $u(k)$ 为点火温度, 在建模中, 采用零-均值进行了归一化处理. 根据定理1, 式(19)中的区间参数的辨识可以通过求解一个二次优化问题, 进而采用解二次优化的方法进行求解. 本文采用MATLAB中的quadprog函数来求解该二次规划问题. 表2给出了辨识得到的基于运动模式的初步预测模型中的区间参数值.

表2 辨识得到的初步预测模型中的区间参数
Table 2 Identified interval parameters in the initial prediction model

θ_i	$(\theta_{ic}, \theta_{ir})$	θ_i	$(\theta_{ic}, \theta_{ir})$
θ_0	(0.0060, 0.0818)	θ_3	(-0.0243, 0.0000)
θ_1	(1.0969, 0.0000)	θ_4	(-0.2105, 0.0521)
θ_2	(0.1186, 0.0000)	θ_5	(-0.0108, 0.0265)

图6中给出了本实验中基于运动模式的初步预测输出曲线. 其中粗实线代表基于运动模式的初步预测模型输出 $d\tilde{x}(k)$ (其值为区间数), 而该图中的线段代表真实的模式类别变量时间序列.

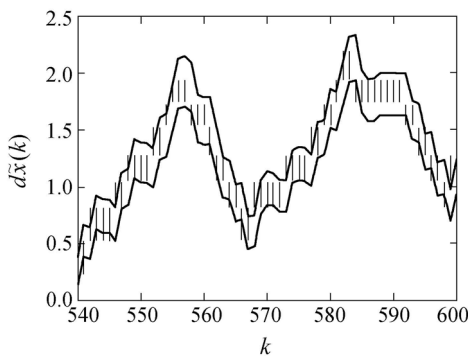


图6 基于运动模式的初步预测模型输出
Fig. 6 The output of initial prediction model based on moving pattern

在得到基于运动模式的初步预测模型输出 $d\tilde{x}(k)$ 后, 这里, 采用最近邻法对初步预测模型输出 $d\tilde{x}(k)$ 进行分类. 图7给出了基于运动模式的最终输出值 $d\hat{x}(k)$. 图中粗实线代表基于运动模式的

预测模型最终输出 $d\hat{x}(k)$ (其值为区间数), 而该图中的线段代表真实的模式类别变量时间序列. 通过比较基于运动模式的预测模型的初步预测输出 $d\tilde{x}(k)$ (见图7), 可以发现某些时刻初步预测输出与真实模式类别变量之间的微小偏差在最终预测输出中被消除了.

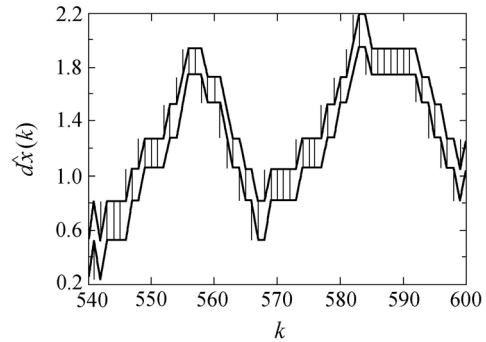


图7 基于运动模式的最终预测模型输出
Fig. 7 The output of final prediction model based on moving pattern

本实验中采用区间预测输出的上、下边界的根均方误差RMSE来定量计算本文所提预测模型的预测精度. $RMSE_{d\hat{x}^L} = 0.2375$, $RMSE_{d\hat{x}^U} = 0.2284$.

模型区间预测输出上界及下界根均方误差的定义分别如式(20)-(21)所示:

$$RMSE_{d\hat{x}^L} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (dx^L(k) - d\hat{x}^L(k))^2}, \quad (20)$$

$$RMSE_{d\hat{x}^U} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (dx^U(k) - d\hat{x}^U(k))^2}. \quad (21)$$

上式中, $dx^L(k)$, $dx^U(k)$ 分别为 k 时刻真实区间时间序列的下、上边界, 而 $d\hat{x}^L(k)$, $d\hat{x}^U(k)$ 分别为模型预测输出的下、上边界, N 为测试样本数.

5.2 基于区间数度量的运动模式控制(Moving pattern measured by interval number for control)

基于前面辨识得到的初步预测模型

$$d\tilde{x}(k) = (0.0060, 0.0818) + (1.0969, 0.0000)dx_c(k-1) + (0.1186, 0.0000)dx_c(k-2) + (-0.0243, 0.0000)dx_c(k-3) + (-0.2105, 0.0521)dx_c(k-4) + (-0.0108, 0.0265)u(k-1). \quad (22)$$

基于式(15)-(18)设计控制器. 在本仿真实验中, 控制的期望输出为区间数 $d\bar{x} = (2.0681, 0.1230)$, 初始状态为

$$dx_c(1) = dx_c(2) = dx_c(3) = dx_c(4) = 0.9315.$$

式(15)中的加权系数为 $\lambda_1 = 0.9$, $\lambda_2 = 0.8$. 图8给出了基于区间数度量的运动模式初步控制输出曲线 $d\hat{x}(k)$ (区间数, 图中两条实线分别代表初步控制输出的上、下边界)和期望的控制输出 $d\bar{x}(k)$ (区间数, 图中两条虚线分别代表期望输出的上、下边界), 从图8可以看出, 基于区间数度量的运动模式初步控制输出曲线 $d\hat{x}(k)$ (实线)与期望的控制输出 $d\bar{x}(k)$ (虚线)之间存在微小的偏差.

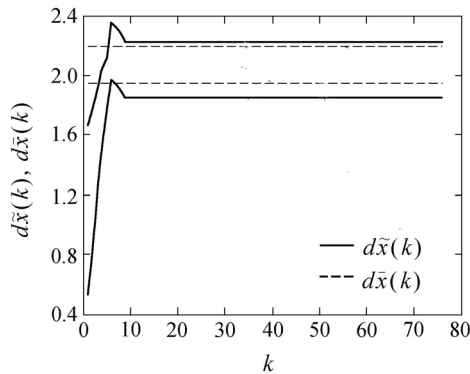


图8 初步控制输出 $d\hat{x}(k)$ 和期望的控制输出 $d\bar{x}(k)$
Fig. 8 The initial control output $d\hat{x}(k)$ and the desired control output $d\bar{x}(k)$

图9给出了基于区间数度量的运动模式最终控制曲线 $d\hat{x}(k)$, 从图9中可以看出, $d\hat{x}(k)$ 经过一段过渡过程后, 初步控制输出曲线 $d\hat{x}(k)$ (见图8)与期望的控制输出 $d\bar{x}(k)$ (虚线)之间存在微小的偏差被消除了. 图10给出了控制输入曲线.

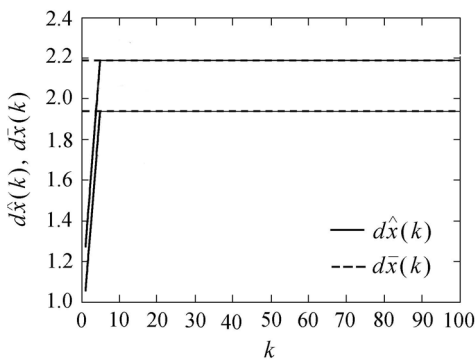


图9 最终控制输出 $d\hat{x}(k)$ 和期望的控制输出 $d\bar{x}(k)$
Fig. 9 The final control output $d\hat{x}(k)$ and the desired control output $d\bar{x}(k)$

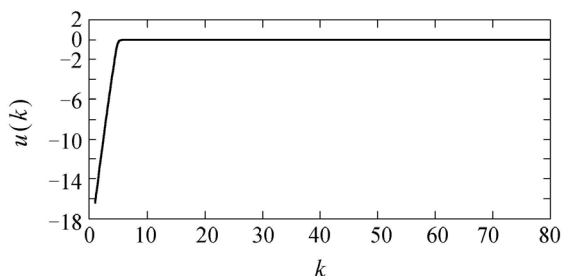


图10 控制输入 $u(k)$
Fig. 10 The control input $u(k)$

在基于运动模式的预测模型中存在一个分类过程, 使得由噪声引起的控制系统的稳态误差被“消化”在分类过程中, 这就使得基于运动模式设计的控制器对噪声不敏感. 为了验证这一点, 将方差为1的高斯白噪声加入到控制输入 $u(k)$, 如图11所示.

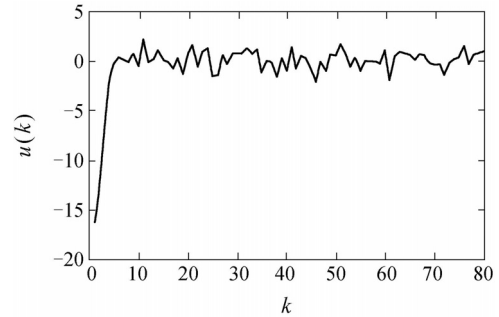


图11 受高斯白噪声干扰的控制输入 $u(k)$
Fig. 11 The control input $u(k)$ with white Gaussian noise interference

在该控制输入 $u(k)$ 的作用下, 系统的初步控制输出曲线如图12所示. 将初步控制输出进行分类, 得到最终的控制输出曲线, 如图13所示. 从图13可以看出, 系统的最终控制输出并未受到控制输入 $u(k)$ 中加入的高斯白噪声的影响, 初步控制输出曲线 $d\hat{x}(k)$ (见图12)与期望的控制输出 $d\bar{x}(k)$ (虚线)之间的偏差被消除了.

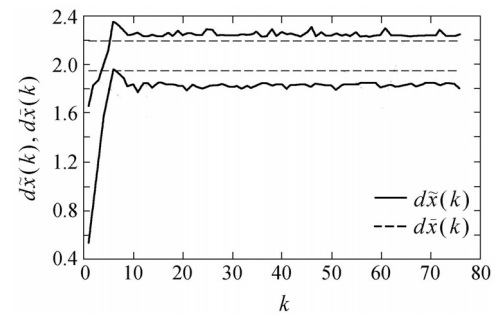


图12 初步控制输出曲线 $d\hat{x}$ 和期望的控制输出 $d\bar{x}$
Fig. 12 The initial control output $d\hat{x}$ and the desired control output $d\bar{x}$

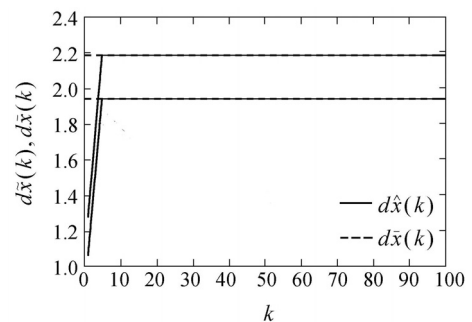


图13 最终控制输出曲线 $d\hat{x}$ 和期望的控制输出 $d\bar{x}$
Fig. 13 The final control output $d\hat{x}$ and the desired control output $d\bar{x}$

6 结论(Conclusions)

本文在笔者前期工作的基础上,针对基于运动模式的建模方法中模式类别变量的度量问题,提出了一种基于区间数度量的运动模式建模,辨识与控制方法.为了描述模式的运动,本文提出了区间ARX(IARX)模型,在此基础上,采用区间ARX(IARX)模型建立基于模式类别变量的控制模型并给出了相应的控制算法.在基于运动模式的预测模型中存在一个分类过程,使得由噪声引起的控制系统的稳态误差被“消化”在分类过程中,这就使得基于运动模式设计的控制器对噪声不敏感.烧结生产过程的仿真实验验证了本文提出的基于区间数度量的运动模式建模与控制方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] 瞿寿德. 智能化的模式识别方法 [J]. 北京科技大学学报, 1998, 20(4): 385 – 389.
(QU Shoude. Pattern recognition approach to intelligent automation for complex industrial processes [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 1998, 20(4): 385 – 389.)
- [2] 瞿寿德, 李泽飞, 周尚明. 模式识别与智能化 [C] // 中国智能自动化学术会议论文集. 天津: 天津大学出版社, 1995: 64 – 66.
(QU Shoude, LI Zefei, ZHOU Shangming. Pattern recognition and intelligent automation [C] // *Proceedings of Intelligent Automation in China*. Tianjin: Tianjin University Press, 1995: 64 – 66.)
- [3] 孙一康, 瞿寿德. 人工智能与过程控制 [J]. 控制理论与应用, 1992, 9(3): 312 – 313.
(SUN Yikang, QU Shoude. Artificial intelligence and process control [J]. *Control Theory & Applications*, 1992, 9(3): 312 – 313.)
- [4] SARIDIS G N, HOFSTADER R F. A pattern recognition approach to the classification on nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1974, 4(4): 362 – 371.
- [5] CADAPARTHI M, BRAHMANANDAM B, CHATTERJI B N. A pattern recognition approach to model characterization of distributed systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1987, 17(3): 488 – 495.
- [6] 叶楠, 吕勇哉. 模式识别在状态估计器中的应用——一类软测量技术 [J]. 仪器仪表学报, 1988, 9(4): 368 – 374.
(YE Nan, LÜ Yongzai. Pattern recognition based state estimation-measurement aids with software [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1988, 9(4): 368 – 374.)
- [7] MCBAIN J, TIMUSK M. Feature extraction for novelty detection as applied to fault detection in machinery [J]. *Pattern Recognition Letter*, 2011, 32(7): 1054 – 1061.
- [8] SBARBARO D, JOHANSEN T A. Analysis of artificial neural networks for pattern-based adaptive control [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2006, 17(5): 1184 – 1193.
- [9] ZHOU X J, CHAI T Y. Pattern-based hybrid intelligent control for rotary kiln process [C] // *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control*. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 30 – 35.
- [10] 王聪, 陈填锐, 刘腾飞. 确定学习与基于数据的建模及控制 [J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 693 – 706.
(WANG Cong, CHEN Tianrui, LIU Tengfei. Deterministic learning and data-based modeling and control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 693 – 706.)
- [11] 徐正光. 智能化的模式识别方法及其工程实现 [D]. 北京: 北京科技大学, 2001.
(XU Zhengguang. *Pattern recognition method of intelligent automation and its implementation in engineering* [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2001.)
- [12] XU Z G, SUN C P. Moving pattern-based approach to modeling of a class of complex production processes [C] // *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 2282 – 2287.
- [13] XU Z G, SUN C P. Moving pattern-based Forecasting Model of a class of complex dynamical systems [C] // *Proceeding of the 50th IEEE International Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 4967 – 4972.
- [14] MOORE R E. *Interval Analysis* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1966.

作者简介:

徐正光 (1959–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂生产过程建模与控制、模式识别、图像处理, E-mail: xzg_1@263.net;

孙昌平 (1981–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为复杂生产过程建模与控制、区间分析、模糊系统、模式识别、图像处理, E-mail: sunchangping2000@sina.com, 本文通讯作者;

吴金霞 (1979–), 女, 博士研究生, 主要研究方向为复杂生产过程建模与控制, E-mail: 79065893@qq.com.