

文章编号: 1001-0920(2005)09-1030-04

## 参数不确定马尔可夫跳变系统的鲁棒适应控制

张利军<sup>1</sup>, 李春文<sup>1</sup>, 程代展<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 100051; 2. 中国科学院 系统所, 北京 100080)

**摘要:** 针对具有参数不确定的线性马尔可夫跳变系统的鲁棒适应控制问题进行了研究. 分析了切换系统切换律的可观测和不可观测情形. 对于可观测的切换律, 利用线性矩阵不等式和共同二次 Lyapunov 函数方法, 得出的具有参数不确定的切换系统是鲁棒可镇定的; 对于切换律符合不可观测的马尔可夫随机过程的情况, 通过设计恰当的采样适应控制器得到系统随机可镇定的充分条件. 并通过例子给出适应镇定控制器的算法.

**关键词:** 马尔可夫跳变系统; 参数不确定; 共同二次 Lyapunov; 适应控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Robust Adaptive Control of Markov Jump Systems with Parameter Uncertainties

ZHANG Li-jun<sup>1</sup>, LI Chun-wen<sup>1</sup>, CHENG Dai-zhan<sup>2</sup>

(1. Department of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 100084, China; 2. Institute of Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: ZHANG Li-jun, E-mail: zhang lj@mail.tsinghua.edu.cn)

**Abstract:** The problem of robust stabilization of linear Markov jump systems with parameter uncertainties via adaptive control is considered. The switching law is assumed to be unobservable Markov process. A sufficient condition is obtained for the stochastic stabilization based on common quadratic Lyapunov functions. An example is used to describe the design of the stabilizing adaptive controller, which stabilizes the system.

**Key words:** Markov jump system; Parameter uncertainties; Common quadratic Lyapunov function; Adaptive control

### 1 引言

近年来, 切换系统理论以其较强的工程实际应用背景成为系统理论研究的热点之一, 如电力系统、机器人手臂控制和智能交通等系统中都广泛地存在切换思想. 有关此方面的文献已有很多<sup>[1~5]</sup>.

切换系统的切换律可分为两类: 可观测切换律和不可观测切换律. 对于可观测的切换律, 它可用于镇定控制设计<sup>[6~8]</sup>; 不可观测切换律是指系统的切换律符合某种随机过程, 这种情况下, 切换模型的识别是必要的. 对此, 文献[9]给出了离散随机跳系统的一些基本的稳定性结果; [10, 11] 讨论了具有马尔可夫随机跳干扰的线性系统稳定性和镇定问

题; [12] 给出了容易验证的平面切换系统二次可镇定的充要条件; 基于此, [13] 利用共同二次 Lyapunov 函数讨论了具有马尔可夫随机跳系统的鲁棒适应控制问题.

本文研究了具有参数不确定的马尔可夫随机跳系统的适应控制问题, 将文献[13]的结果推广到参数不确定的情况. 利用线性矩阵不等式和共同 Lyapunov 函数方法, 给出鲁棒适应镇定控制器存在的充分条件及其设计算法.

### 2 概念和符号

线性切换系统一般可表示为<sup>[3]</sup>

$$\dot{x}^a = A_{R(x,t)} x, x \in R^n. \quad (1)$$

收稿日期: 2004-10-26; 修回日期: 2005-01-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(G64274010, 60343001); 中国博士后基金项目(2004036246).

作者简介: 张利军(1973—), 男, 陕西吴堡人, 教授, 从事非线性系统控制、切换系统控制等研究; 程代展(1947—), 男, 福建福州人, 从事非线性系统控制、复杂系统控制的研究.

这里  $R(x, t): R^n \times [0, \infty) \rightarrow +$  分段连续函数, 并且  $+ = \{1, 2, \dots, N\}$ .

切换控制系统可表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}^a &= A_{R(x,t)}x + B_{R(x,t)}u_{R(x,t)}, \\ x &\in R^n, u_{R(x,t)} \in R^m. \end{aligned} \quad (2)$$

本文均假设切换律  $R(x, t) = R(t)$  符合马尔可夫随机过程. 首先给出如下的随机稳定定义:

**定义 1** 假设系统(1) 或系统(2) 的切换律符合某一随机过程, 那么系统(1) 是随机稳定的; 如果

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E \|x(t)\|^2 = 0, \quad (3)$$

并存在控制使得闭环系统(2) 的解轨线满足(3), 则系统(2) 是随机可镇定的.

本文考虑的是下面带有参数不确定项的切换系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}^a &= (A_{R(x,t)} + \Delta A_{R(x,t)})x + (B_{R(x,t)} + \\ &\Delta B_{R(x,t)})u_{R(x,t)}, x \in R^n. \end{aligned} \quad (4)$$

对于第  $i$  个子系统, 假设

$$\begin{aligned} [\Delta A_i, \Delta B_i] &= E_i \# [F_{1i}, F_{2i}], \\ \#^T \# &\leq I, P_i \in +. \end{aligned}$$

其中:  $\#$  为不确定的;  $E_i, F_{1i}, F_{2i}$  为给定的常数矩阵.

**引理 1**<sup>[14]</sup> 令  $M, \#, N$  是具有适当维数的矩阵, 且  $\#$  为一个不确定矩阵, 它满足  $\#^T \# \leq I$ , 那么对于  $P x \in R^n$ , 有

$$\max \{(x^T M \# N x)^2\} = x^T M M^T x x^T N^T N x. \quad (5)$$

令

$$\begin{aligned} D &= \max_{i \in +} \{R_{\max}(E_i)\}, D_F = \max_{i \in +} \{R_{\max}(F_{1i})\}, \\ D_F &= \max_{i \in +} \{R_{\max}(F_{2i})\}, D_K = \max_{i \in +} \{R_{\max}(K_i)\}. \end{aligned}$$

这里,  $K_i$  为一个给定的常数矩阵,  $D_{\max}(\delta)$  表示矩阵的最大奇异值.

本文的目的是将可观测切换律的镇定结果推广到不可观测切换律的情况, 即在一定条件下, 如果系统(4) 在可观测切换律下是二次镇定的, 那么在不可观测的马尔可夫随机切换律下也是二次镇定的.

### 3 适应可镇定性

首先, 假设切换系统(2) 的每个切换子系统在共同 Lyapunov 函数  $V(x) = x^T M x$  下是反馈可镇定的, 这样存在反馈  $u_i = K_i x$  和常数  $\tilde{r} > 0$ , 使得

$$M(A_i + B_i K_i) + (A_i + B_i K_i)^T M \leq -\tilde{r} M. \quad (6)$$

可以证明对于给定的满足(6) 的  $M$  和  $K_i$ , 系统  $(A_i + \Delta A_i, B_i + \Delta B_i)$  在一定条件下有类似于式(6) 的不等式成立.

**命题 1** 对于给定的满足式(6) 的  $M$  和  $K_i$ , 如果存在  $\$r$  满足  $\tilde{r} - \hat{u} \$r \hat{u} > 0$ , 并且下列矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -\hat{u} \$r \hat{u} M & M & I \\ M & (-1/\hat{D})I & 0 \\ I & 0 & -(1/d)I \end{bmatrix} < 0, \quad (7)$$

那么存在常数  $r < 0$ , 使得

$$\begin{aligned} M(A_i + \Delta A_i + (B_i + \Delta B_i)K_i) + \\ (A_i + \Delta A_i + (B_i + \Delta B_i)K_i)^T M \leq -rM, \end{aligned} \quad (8)$$

这里

$$\begin{aligned} d &= \hat{D}_F + \hat{D}_F^T \hat{D}_F + \hat{D}_K + \hat{D}_F^T \hat{D}_K, \\ r &= \tilde{r} - \hat{u} \$r \hat{u}. \end{aligned}$$

证明 根据 Schur 补定理, 线性矩阵不等式(7) 可写为

$$-\hat{u} \$r \hat{u} M + \hat{D} M M + d I < 0,$$

进一步有

$$\begin{aligned} -\tilde{r} M + \hat{D} M M + (\hat{D}_F^2 + \hat{D}_F^T \hat{D}_F + \\ \hat{D}_K + \hat{D}_F^T \hat{D}_K) I < -rM. \end{aligned} \quad (9)$$

由于系统(2) 在任意切换律下是反馈可镇定的, 即式(6) 成立. 那么利用引理 1 和不等式(9), 共同 Lyapunov 函数  $V(x)$  沿着系统(4) 的轨线的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}^a &= x^T M(A_i + B_i K_i) + (A_i + B_i K_i)^T M x + \\ &x^T M E_i \#(F_{1i} + F_{2i} K_i) x \leq -\tilde{r} x^T M x + \\ &x^T M E_i E_i^T M x + x^T (F_{1i} + F_{2i} K_i)^T (F_{1i} + \\ &F_{2i} K_i) x \leq -\tilde{r} x^T M x + \hat{D} x^T M M x + \\ &x^T (\hat{D}_F + \hat{D}_F^T \hat{D}_F + \hat{D}_K + \hat{D}_F^T \hat{D}_K) I x \leq \\ &-r x^T M x. \end{aligned}$$

命题 1 得证.  $\square$

由命题 1, 对于系统(4), 容易求得

$$\|x_{t+h}^i\|_M^2 \leq e^{-\tilde{r} h} \|x_t^i\|_M^2, \quad (10)$$

这里  $\|\delta\|_M$  为  $M > 0$  的 Frobenius 范数.

下面再次考虑系统(4), 这里  $R(x, t) = R(t)$  为不可观测的满足马尔可夫随机过程的切换律. 本文讨论基于可观测的情况, 即首先设切换律  $R(t)$  为可观测的.

类似于离散系统<sup>[15]</sup>, 给出下列假设:

**假设 1**  $R(t)$  为一个不可观测的马尔可夫随机过程, 它是时间齐次的, 并且在有限集  $+ = \{1, 2, \dots, N\}$  上取值. 它的生成矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} -q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1N} \\ q_{21} & -q_{22} & \dots & q_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{N1} & q_{N2} & \dots & -q_{NN} \end{bmatrix},$$

这里:  $q_i \geq 0$  且  $q_{ii} = \sum_{j \neq i} q_{ij}, i = 1, \dots, N$ . 那么转移矩阵为

$$P(t) = \exp(Qt). \quad (11)$$

令  $P_m = \max_{i \leq j \leq N} q_{ij}$ . 利用式(11), 容易得到

$$\sum_{j \neq i} P_{ij}(s) \mu_{q_{ij} s} \leq P_{ms},$$

当  $0 < s_n \leq 1$  时. (12)

**定义 2**<sup>[15]</sup> 一组线性系统  $(A_i, B_i), i = 1, \dots, N$  为反馈可辨别的, 如果存在反馈  $K$  使得

$$\det(A_i + B_i K - A_j - B_j K) \neq 0$$

$$1 \leq i < j \leq N. \quad (13)$$

根据上述定义, 相应地, 对于切换系统(4), 可定义鲁棒反馈是可辨别的.

**定义 3** 线性切换系统(4) 为鲁棒反馈可辨别的, 如果存在反馈  $K$  使得

$$\det((A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K - (A_i + \mathcal{A}A_i) - (B_i + \mathcal{B}B_i)K) \neq 0,$$

$$1 \leq i < j \leq N. \quad (14)$$

**注 1** 对于给定的满足不等式(13) 的反馈  $K$ , 由行列式值的连续性可知, 可得到系统(4) 是鲁棒反馈可辨别的.

**命题 2** 假设切换线性系统  $(A_i + \mathcal{A}A_i, B_i + \mathcal{B}B_i) (i = 1, \dots, N)$  是鲁棒反馈可辨别的. 如果存在反馈  $K_i$  使得  $(A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_i, i = 1, \dots, N$ , 享有共同二次 Lyapunov 函数(QLF), 那么这些  $K_i$  中一定存在满足(14) 的  $K_i$ .

**证明** 令  $M$  是  $(A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_i$  的共同 QLF, 由连续性可知, 存在  $K_i \in R^{m \times n} (i = 1, \dots, N)$  的邻域  $U_i$ , 使得  $M$  是  $(A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_i$  的共同 QLF, 这里  $K_i \in U_i$ . 由于存在  $K$  使得(14) 成立, 那么不满足式(14) 的  $K$  的集合是一个代数零集<sup>[16]</sup>. 这意味着满足式(14) 的  $K$  构成  $R^{m \times n}$  空间的一个开稠子集. (这里假设状态空间为  $R^n$ , 输入空间为  $R^m$ ). 表示这个集合为  $S_K$ . 由于  $S_K$  是一个开稠集, 且  $U_i$  是开的, 则  $S_K \cap U_i \neq \emptyset$ . 选择  $K_i \in S_K \cap U_i$ , 那么  $(A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_i (i = 1, 2, \dots, N)$  仍以  $M$  作为它们的共同 QLF. 而且, 因为  $K_i \in S_K$ , 所以对于  $P_i, K_i$  仍满足式(14).  $\square$

利用  $r_0$  表示可行  $r$  的最小上界. 即

$$r_0 = \inf \{ r \mid M(A_i + \mathcal{A}A_i + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_i) + (A_i + \mathcal{A}A_i + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_i)^T M \leq -rM, P_i \in + \}.$$

对于系统(4), 给出基本假设:

**假设 2** 1) 切换系统  $(A_i + \mathcal{A}A_i, B_i + \mathcal{B}B_i) (i = 1, 2, \dots, N)$  是鲁棒反馈可辨别的;

2)  $2P_m < r_0$ .

**注 2** 假设 2 的 2) 对于后面进行采样估计是很重要的. 直观地讲, 此不等式表示系统不能在一个切换子模型停留的时间过长.

下面构建适应控制律. 令  $h$  为采样周期,  $x_k =$

$x(kh), R_k = R(kh)$ . 类似于文献[15], 令  $R_k$  的估计  $\hat{R}_k$  是任意的, 并依次定义  $R_k$  的估计, 即

$$\hat{R}_k = \arg \min_i \{ \| x_k - \exp(h((A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_{\hat{R}_{k-1}})) x_{k-1} \| \}. \quad (15)$$

由假设 2 的 1) 和式(9), 存在  $K_1, \dots, K_N$  使得  $(A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_i$  享有共同 QLF  $x^T M x$ , 且对所有的  $i, K_i$  满足式(14), 则有下列引理:

**引理 2**<sup>[13]</sup> 取适应控制律

$$u(t) = K_{\hat{R}_k} x, (k-1)h \leq t < kh;$$

得下列估计

$$P(\hat{R}_k = R_k \geq 1 - \sum_{j \neq R_k} P_{R_k, j}(h)). \quad (16)$$

**定理 1** 如果具有可观测切换律  $R(t)$  的切换系统(4) 是二次镇定的, 那么对于具有不可观测切换律  $R(t)$  的系统(4), 如果满足条件假设 1 和假设 2, 那么通过设计下列采样适应控制律

$$u(k) = K_{\hat{R}_k} x, kh \leq t < (k+1)h, \quad (17)$$

使其随机可镇定. 这里  $h > 0$  足够小, 且  $\hat{R}_k (k = 1, 2, 3, \dots)$  由式(15) 确定.

**证明** 首先选择  $K_i, i = 1, 2, \dots, N$ , 使得  $(A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_i$  有共同二次 Lyapunov 函数  $x^T M x$ . 另外, 由于式(14) 对所有的  $K_i$  都成立, 即

$$\max_{1 \leq i, j \leq N} \{ \| (A_i + \mathcal{A}A_i) + (B_i + \mathcal{B}B_i)K_j \| \} = T.$$

可得估计

$$E \| x_{k+1} \|_M^2 \leq E(\| x_{k+1} \|_M^2 \mid \hat{R}(t) \equiv R_k) \cap (R_k = \hat{R}_k) + e^{2Th} E \| x_k \|_M^2 P(R(t) \neq R_k) + e^{2Th} E \| x_k \|_M^2 P(R_k \neq \hat{R}_k) \leq e^{-r_0 h} E \| x_k \|_M^2 + e^{2Th} E \| x_k \|_M^2 (P(R(t) \neq R_k) + P(R_k \neq \hat{R}_k)), \quad (18)$$

这里  $kh \leq t < (k+1)h$ .

下面只需要估计概率. 利用式(12) 和(13), 有

$$P(R_k \neq \hat{R}_k) \leq h \times P_m, \quad (19)$$

可得到

$$P(R(t) \neq R_k) \leq P(R_{k+1} \neq R_k) + \sum_{s=1}^N \int_0^h P_{R_k, s}(s) P_{S, R_k}(h-s) ds \leq P_m h + NP_m^2 \int_0^h s(h-s) ds = P_m h + \frac{1}{6} NP_m^2 h^3. \quad (20)$$

将式(19) 和(20) 带入式(18) 得

$$E \| x_{k+1} \|_M^2 \leq e^{-r_0 h} E \| x_k \|_M^2 + e^{2Th} E \| x_k \|_M^2 (2P_m h + \frac{1}{6} NP_m^2 h^3) = [e^{-r_0 h} + e^{2Th} (2P_m h +$$

$$\frac{1}{6}NP_m^2h^3)E \| x_k \|^2_M \mu (1 - r_0h + 2P_mh)E \| x_k \|^2_M. \tag{21}$$

假设 2 的 2) 保证了存在一个  $L, 0 < L < 1$ , 使得当  $h$  足够小时

$$E \| x_{k+1} \|^2_M \leq LE \| x_k \|^2_M,$$

它说明了

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} E \| x_t \|^2_M = 0,$$

即

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} E \| x_t \|^2 = 0. \quad \square$$

**注 2** 该结果可适用于任意维的切换系统. 但一般来说, 对于具有可观测切换律  $R(t)$ , 目前仍没有办法求得切换系统的共同二次 Lyapunov 函数. 但对于平面切换系统, 已经得到易验证、可镇定的共同 Lyapunov 函数存在的充要条件<sup>[12]</sup>.

### 4 适应控制的算法

采样适应控制的一个优点是它易于在计算机上实现. 事实上, 式(15) 仅能在采样时刻进行数值计算. 下面通过举例给出适应控制器设计的算法. 该算例中的共同 Lyapunov 函数和反馈律通过文献 [12] 中的算法得到.

**例 1** 考虑系统

$$\dot{x}^a = A_{R(x,t)}x + b_{R(x,t)}u_{R(x,t)},$$

这里  $R(x, t): \mathbb{R}^2 \times [0, \infty) \rightarrow \{1, 2, 3, 4\}$ , 它有 4 个切换子系统:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2.2 \\ -1.8 & -2.5 \end{bmatrix}, b_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.9 & 2.345 \\ -2.15 & -2.50 \end{bmatrix}, b_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 1.89 \\ -2.2 & -2.9 \end{bmatrix}, b_3 = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0.4 & 1.9125 \\ 2.275 & -2.850 \end{bmatrix}, b_4 = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 1 \end{bmatrix};$$

给出反馈增益为

$$K_1 = (-0.2 \quad -0.5), K_2 = (0.1 \quad -0.2),$$

$$K_3 = (0.3 \quad 0.1), K_4 = (0.4 \quad 0.1),$$

相应地, 共同二次 Lyapunov 函数矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

对于以上给定的反馈和共同二次 Lyapunov 函数, 可取不确定项

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1925 \\ 0.195 & 0.4 \end{bmatrix}, b_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.02 & -0.0975 \\ 0.115 & 0.27 \end{bmatrix}, b_2 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -0.03 & -0.0925 \\ 0.015 & 0.12 \end{bmatrix}, b_3 = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.3 \end{bmatrix};$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} -0.06 & -0.07 \\ 0.01 & 0.09 \end{bmatrix}, b_4 = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.1 \end{bmatrix};$$

容易计算系统(4) 满足条件式(7), 即利用上述反馈控制可使得在共同 Lyapunov 函数  $x^T M x$  下, 系统(4) 为可镇定的.

假设 1 成立,  $R(t)$  为一个不可观测的马尔可夫随机过程, 对于转移矩阵  $Q$ , 取

$$\max_{1 \leq i \leq 10} q_i = 0.8,$$

则  $P_m = 0.8$ .

首先令  $K = K_1 = (-0.2, -0.5)$ , 容易验证不等式(14) 是满足的. 因此假设 2 的 1) 成立. 可取  $1.61 < r_0 < 1.65$ . 在此取  $r_0 = 1.61$ . 很明显假设 2 的 2) 是成立的. 根据定理 1, 切换系统(4) 是适应可镇定的.

### 5 结 论

本文讨论了具有参数不确定的线性马尔可夫跳变系统的镇定问题. 假设相应可观测切换律的切换系统的二次镇定问题是可解的, 则对于切换律符合不可观测的马尔可夫随机过程, 可得到适应可镇定问题可解的充分条件. 本文推广了文献[13]的结果到参数不确定的情况, 并通过一个例子给出适应控制器设计的算法.

### 参考文献(References)

[1] Liberzon D, Morse A S. Basic Problems on Stability and Design of Switched Systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 34(6): 1914-1946.

[2] Branicky M S. Multiple Lyapunov Functions and Other Analysis Tools for Switched Hybrid Systems[J]. IEEE Trans Automatic Control, 1998, 43(4): 475-482.

[3] Sun Z, Zheng D. On Reachability and Stabilization of Switched Linear Systems[J]. IEEE Trans Automatic Control, 2001, 46(2): 291-295.

[4] 谢广明, 王龙, 叶庆凯. 一类混杂动态系统的能控性(Ë)——含多时滞的情形[J]. 应用数学和力, 2003, 24(9): 940-950. (Xie G M, Wang L, Ye Q K. Controllability of a Class of Hybrid Dynamic Systems (Ë)- Multi-Time Delays Case[J]. Application Math and Mechanic, 2003, 24(9): 940-950.)

[5] Fang Y, Loparo K A. Stabilization of Continuous-time Jump Linear Systems [J]. IEEE Trans Automatic Control, 2002, 47(10): 1590-1603.

模型经 10 次更新后, 对于图 3 中被监测的止逆环故障数据, 其在线监测 SPE 控制图如图 4 所示, 与图 3 的 SPE 图比较, 图 4 的 SPE 统计控制限经 10 次调整后, 控制限存在显著的差异. 调整后的子时段模型及统计控制限随着新增加的建模数据逐渐趋向于正常间歇操作之间的统计分布, 而且在某些时段的过渡之间(如在 350 ~ 450 之间), 其对故障的监测能力提高了.

#### 4 结 论

本文提出的子时段 PCA 建模、监测方法, 具有以下特点:

1) 初始模型只需要一次正常操作的数据, 适合那些过程反应慢、间歇操作周期长、数据采集比较困难的间歇工业过程;

2) 多模型建模方式. 在每个不同相关性特征子数据空间分别建立子模型, 不同操作阶段切换不同的子模型, 提高检测幅值较小故障的能力;

3) 准确性. 在线监测算法不需要预测将来的测量数据, 可实现快速的故障检测和诊断, 因此与其他需要利用状态预报的各种诊断技术相比精度更高;

4) 此方法容易推广应用于不等长间歇工业过程.

#### 参考文献(References)

- [1] Nomikos P, MacGregor J F. Monitoring of Batch Processes Using Multi-way Principal Component Analysis[J]. *AIChE J*, 1994, 40(8): 1361-1375.
- [2] Nomikos P, MacGregor J F. Multivariate SPC Charts for Monitoring Batch Processes [J]. *Technometrics*, 1995, 37(1): 41-59.
- [3] Undey C, Cinar A. Statistical Monitoring of Multistage, Multiphase Batch Processes [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(10): 40-52.
- [4] Kourti T. Multivariate Dynamic Data Modeling for Analysis and Statistical Process Control of Batch Processes, Start-ups and Grade Transitions [J]. *J Chemometrics*, 2003, 17(1): 93-109.
- [5] Lu N Y, Gao F R, Wang F L. A Sub-PCA Modeling and On-line Monitoring Strategy for Batch Processes [J]. *AIChE J*, 2004, 50(1): 255-259.
- [6] Johnson R A, Wichern D W. *Applied Multivariate Statistical Analysis* [M]. New York: Prentice Hall, 2002.
- [6] Zhao J, Nie H. Sufficient Conditions for Input to State Stability of Switched Systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(2): 252-257.
- [7] 王泽宁, 费树岷, 冯纯伯. 一类开关切换系统的输出反馈镇定[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 169-174.  
(Wang Z N, Fei S M, Feng C B. Output Feedback Stabilization for a Class of Switching Systems [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 169-174.)
- [8] 王仁明, 关治洪, 刘新芝. 一类非线性切换系统的稳定性分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(1): 68-71.  
(Wang R M, Guan Z H, Liu X Z. Stability Analysis of a Kind of Nonlinear Switched Systems [J]. *System Engineer and Electric Technology*, 2004, 26(1): 68-71.)
- [9] Costa O, Fragoso M. Stability Results for Discrete Time Linear Systems with Markovian Jumping Parameters [J]. *J Mathematical Analysis Application*, 1993, 179: 154-178.
- [10] Morozan T. Stability and Control for Linear Systems with Jump Markov Perturbations [J]. *Stochastic Analysis Application*, 1995, 13(1): 91-110.
- [11] Fragoso M, Costa O. Mean Square Stabilizability of Continuous-time Linear Systems with Partial Information on the Markovian Jumping Parameters [J]. *Stochastic Analysis Application*, 2004, 22(2): 99-111.
- [12] Cheng D. Stabilization of Planar Switching Systems [J]. *System Control Letter*, 2004, 51(2): 79-88.
- [13] Cheng D, Zhang L. Adaptive Control of Linear Switched Systems [A]. *CDC03* [C]. Hawaii, 6260-6264.
- [14] Petersen I R. A Stabilization Algorithm for a Class of Uncertain Linear Systems [J]. *System and Control Letter*, 1987, 8(1): 351-357.
- [15] Xue F, Guo L. Necessary and Sufficient Conditions for Adaptive Stabilizability of Jump Linear Systems [J]. *Communications in Information and Systems*, 2001, 1(2): 205-224.
- [16] Hecke E. *Lecture on the Theory of Algebraic Number* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

(上接第 1033 页)