

文章编号: 1001-0920(2005)03-0312-04

离线鲁棒预测控制器综合方法的改进方案

丁宝苍, 杨鹏, 孙鹤旭, 董砚
(河北工业大学 自动化研究所, 天津 300130)

摘要: 对离线鲁棒预测控制器综合方法进行改进. 离线鲁棒预测控制算法离线确定一个控制律序列, 对应一组吸引域; 在线根据当前状态位于哪个吸引域内部(或哪两个吸引域之间)选择相应的一个控制律(或相邻的两个控制律的线性插值). 引入参数Lyapunov函数得到多包椭圆型吸引域和多包二次稳定的离线控制律, 改进了控制器的可行性和最优性. 改进的控制器保持了稳定性以及控制律关于系统状态的连续性.

关键词: 鲁棒预测控制; 吸引域; 线性插值; 参数Lyapunov函数

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Improved off-line synthesis approach of robust model predictive control

DING Bao-cang, YANG Peng, SUN He-xu, DONG Yan

(Institute of Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China. Correspondent: DING Bao-cang, E-mail: dingbc@jmail.hebut.edu.cn)

Abstract: The synthesis approach of off-line robust model predictive control is improved. This kind of algorithm off-line determines a control-law-sequence with corresponding domains of attraction. The control law is chosen according to the domain of attraction in which the current state lies, or the linear interpolation of two control laws is chosen corresponding to two domains of attraction between which the current state lies. The parameter-dependent Lyapunov function is introduced to obtain poly-ellipsoidal domains of attraction and poly-quadratically stable off-line control laws, and the feasibility and optimality are improved. The improved controller preserves stability and continuity of the control law with respect to the system state.

Key words: robust model predictive control; domain of attraction; linear interpolation; parameter-dependent Lyapunov function

1 引言

近年来,国内外对不确定性系统的鲁棒预测控制器的综合问题进行了较多的研究.在保证稳定的前提下,主要目标是降低在线计算量,改进可行性和最优性^[1].由于表示不确定性的方法较多,综合方法也是多种多样,与本文直接相关的包括文献[2~4]的方法.文献[2]采用LMI方法求解无穷时域二次型性能指标下的“最大-最小”优化问题,将其简化为在每个时刻求解一个固定的线性状态反馈控制律,在该控制律作用下,当前状态必位于相应的某一椭圆

型集合内,未来的状态将向原点收敛.由于要在线求解LMI优化问题,该方法一般计算量较大.有鉴于此,文献[3,4]提出了改进措施,即离线确定一系列的线性状态反馈控制律及其相应的椭圆型集合,在线选择当前状态所处的最小一个椭圆集对应的控制律.当状态位于两个相邻椭圆集之间的环形区域时,实际控制律采用两个相应的离线控制律的线性插值,这样可实现控制律的连续切换,提高控制效果.

文献[2~4]的共性在于得到的闭环系统或离线控制律是二次稳定的^[5].二次稳定系统一般具有较

收稿日期: 2004-04-09; 修回日期: 2004-06-18

作者简介: 丁宝苍(1972—),男,河北隆化人,副教授,博士,从事自适应控制、预测控制等研究; 杨鹏(1958—),男,河北昌黎人,教授,博士,从事智能控制等研究

弱的可行性和较差的最优性 文献[6]引入参数 Lyapunov 函数对[2]的算法进行改进,得到的系统是多包二次稳定的 但同文献[2]一样,[6]在每个时刻都要求解复杂的LM I优化问题 本文的改进方案是在离线计算中采用参数 Lyapunov 函数,得到一系列非椭圆型集合——每个非椭圆型集合是一组椭圆型集合的交集 这样,在线计算量同文献[3,4]相比虽略有增加,但与文献[2,6]相比仍小得多,并且可行性和最优性将得到改善

本文所用符号说明如下: \mathbf{R}^n 表示 n 维实空间;对于向量 x 和正定矩阵 W , $x^T W x$; $x(k+i|k)$ 为在 k 时刻对未来 $k+i$ 时刻的变量 x 的预测值; I 表示相应维数的单位阵;符号 * 给出对称结构表示,比如若 H 和 R 为对称矩阵,则

$$\begin{bmatrix} H + S + * & * \\ T & R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H + S + S^T & T^T \\ T & R \end{bmatrix}.$$

2 问题描述

考虑如下时变和/或不确定系统:

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k), \quad (1)$$

其中 $u \in \mathbf{R}^m$ 和 $x \in \mathbf{R}^n$ 分别为输入和可测状态 系统约束为

$$-u \leq u(k+i) \leq \bar{u}, \quad \forall i \geq 0 \quad (2)$$

其中: $u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T, \bar{u} = [\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_m]^T, u_j > 0, \bar{u}_j > 0, j = 1, 2, \dots, m.$ 为简化描述,这里只考虑输入饱和约束,当存在其他约束时,处理方法参见文献[2~4,7].

假设

$$\begin{bmatrix} A(k) & B(k) \end{bmatrix} \in \Omega = \text{Co}\{A_1 | B_1, A_2 | B_2, \dots, A_L | B_L\}, \quad \forall k \geq 0,$$

即存在 L 个非负系数 $\omega(k), l = 1, 2, \dots, L$, 使得

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} A(k) & B(k) \end{bmatrix} = \sum_{l=1}^L \omega(k) [A_l | B_l], \\ \sum_{l=1}^L \omega(k) = 1. \end{cases} \quad (3)$$

目标是针对上述系统设计鲁棒预测控制器,将系统(1)驱动到稳态 $(x_{ss}, u_{ss}) = (0, 0)$. 在每个时刻 k , 求解如下优化问题^[7]:

$$\begin{aligned} \min_{u(k)} \max_{[A(k+i) | B(k+i)] \in \Omega, i \geq 0} J(k) = & \\ & \sum_{i=0}^{\infty} [x(k+i|k)^T Q + u(k+i|k)^T R], \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } -u \leq u(k+i|k) \leq \bar{u} \quad (4b)$$

其中

$$\begin{aligned} x(k+i+1|k) = & \\ A(k+i)x(k+i|k) + B(k+i)u(k+i|k), & \end{aligned}$$

$$x(k|k) = x(k),$$

$Q > 0$ 和 $R > 0$ 为加权矩阵

文献[2]对每个时刻 k 采用唯一的线性状态反馈律作为问题(4)的解,即 $u(k+i|k) = F(k)x(k+i|k), \forall i \geq 0$ 定义二次函数

$$\begin{aligned} V(i, k) = x(k+i|k)^T P(k)x(k+i|k), \\ P(k) > 0, \quad \forall k \geq 0, \end{aligned}$$

并强制满足如下鲁棒稳定性约束:

$$\begin{aligned} V(i+1, k) - V(i, k) - x(k+i|k)^T Q - u(k+i|k)^T R, \\ \nabla [A(k+i) | B(k+i)] \in \Omega, i \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

在系统稳定的情况下, $x(k|k) = 0, V(0, k) = 0$ 易知

$$\max_{[A(k+i) | B(k+i)] \in \Omega, i \geq 0} J(k) = V(0, k) = \mathcal{Y}, \quad (6)$$

其中变量 $\mathcal{Y} > 0$ 定义变量 $Q = \mathcal{Y}P(k)^{-1}$ 和 $F(k) = YQ^{-1}$, 则式(5)和(6)可转化为如下LM I

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ A Q + B Y & Q & * & * \\ Q^{1/2} Q & 0 & \mathcal{Y} & * \\ R^{1/2} Y & 0 & 0 & \mathcal{Y} I \end{bmatrix} \leq 0, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ x(k) & Q \end{bmatrix} \leq 0, Q > 0 \quad (8)$$

当如下LM I满足时:

$$\begin{bmatrix} Z & Y \\ Y^T & Q \end{bmatrix} \leq 0, Z_{jj} \leq z_{j, \text{inf}}, j = 1, \dots, m. \quad (9)$$

其中: $z_{j, \text{inf}} = \min\{u_j, \bar{u}_j\}, Z_{jj}$ 为 Z 的第 j 个对角元 则约束(4b)也满足,从而优化问题(4)可转化为

$$\min_{x, Q, Y, Z} \mathcal{Y}, \text{ s.t. } (7) \sim (9). \quad (10)$$

在线求解式(10)的计算量较大 文献[4]在[2]的基础上提出如下离线鲁棒预测控制算法,即将求解式(10)转化为离线计算

算法 1^[4]

1) 离线确定一系列状态点 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$, 这些状态点从远离原点处逐渐靠近原点 用 x_i 替换式(8)中的 $x(k)$, 求解式(10)得到相应的 $\{Q_i, Y_i\}$, 从而得到椭圆集 $E_i = \{x \in \mathbf{R}^n | x^T Q_i^{-1} x \leq 1\}$ 和控制律 $F_i = Y_i Q_i^{-1}$.

2) 对于每个 $x_i (i = 1 \sim N)$, 如果下式成立:

$$Q_i^{-1} - (A_l + B_l F_{i+1})^T Q_i^{-1} (A_l + B_l F_{i+1}) > 0, \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad (11)$$

则每个时刻 k 在线地采用如下控制律:

$$F(k) = \begin{cases} F(\alpha(k)), & x(k)^T Q_i^{-1} \leq 1, \\ x(k)^T Q_{i+1}^{-1} > 1, i = N; \\ F_N, & x(k)^T Q_N^{-1} \leq 1. \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$F(\alpha(k)) = \alpha(k)F_i + (1 - \alpha(k))F_{i+1},$$

$$x(k)^T [\alpha(k)Q_i^{-1} + (1 - \alpha(k))Q_{i+1}^{-1}]x(k) = 1,$$

$$\begin{matrix} 0 & \alpha(k) & 1 \end{matrix}$$

本文的主要目的是利用Lyapunov函数改进算法1.

3 主要改进策略

首先引入一个附加变量G(不要求对称性),并定义 $F(k) = YG^{-1}$.这样,相对于优化问题(4)和每个 x_i ,式(7)~(9)可替换为^[8]

$$\begin{bmatrix} G_i + G_i^T - Q_i & * & * & * \\ A_i G_i + B_i Y_i & Q_i & * & * \\ Q_i^{1/2} G_i & 0 & Y_i I & * \\ R^{1/2} Y_i & 0 & 0 & Y_i L \end{bmatrix} 0,$$

$$l = 1, 2, \dots, L; \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ x_i & Q_i \end{bmatrix} 0, Q_i > 0; \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} Z_i & * \\ Y_i^T & G_i + G_i^T - Q_i \end{bmatrix} 0,$$

$$Z_{i,jj} \quad z_{j,\text{inf}}^2, j = 1, 2, \dots, m. \quad (15)$$

然后在初始状态为 x_i 时,将优化问题(4)转化为

$$\min_{Y_i, Q_i, G_i, Z_i} \mathcal{Y}_i, \text{ s t } (13) \sim (15). \quad (16)$$

采用如下LM I代替约束条件(11):

$$\begin{bmatrix} G_{i+1} + G_{i+1}^T - Q_i & * \\ A_i G_{i+1} + B_i Y_{i+1} & Q_i \end{bmatrix} 0,$$

$$l = 1, 2, \dots, L. \quad (17)$$

由文献[6,8]知,引入G不改变可行性,即对可行性而言,式(16)与(10)等价,式(17)与(11)等价.

进一步定义二次函数

$$V(i, k) = x(k+i|k)^T P(i, k)x(k+i|k),$$

$$P(i, k) > 0, \forall i, k \in \mathbb{N}$$

其中 $P(i, k)$ 与 $P(k)$ 的主要区别在于 $P(i, k)$ 相对于参数 i 也是时变的.假设存在 L 个对称正定矩阵 $P_l(k)$,满足

$$\begin{cases} P(i, k) = \sum_{l=1}^L \omega(k+i) P_l(k), \\ \sum_{l=1}^L \omega(k+i) = 1. \end{cases} \quad (18)$$

其中 ω 同式(3).则 $V(i, k)$ 称为参数Lyapunov函数.定义变量 $Q_l = \mathcal{Y} P_l(k)^{-1} (l = 1, 2, \dots, L)$ 和 $F(k) = YG^{-1}$,则相对于优化问题(4)和每个 x_i ,式(13)~(15)可替换为

$$\begin{bmatrix} G_i + G_i^T - Q_{l,i} & * & * & * \\ A_i G_i + B_i Y_i & Q_{l,i} & * & * \\ Q_{l,i}^{1/2} G_i & 0 & Y_i I & * \\ R^{1/2} Y_i & 0 & 0 & Y_i L \end{bmatrix} 0,$$

$$l = 1, 2, \dots, L, t = 1, 2, \dots, L; \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ x_i & Q_{l,t} \end{bmatrix} 0, Q_{l,t} > 0; l = 1, 2, \dots, L; \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} Z_i & * \\ Y_i^T & G_i + G_i^T - Q_{l,t} \end{bmatrix} 0,$$

$$Z_{i,jj} \quad z_{j,\text{inf}}^2, j = 1, \dots, m, l = 1, \dots, L. \quad (21)$$

在初始状态为 x_i 时,将优化问题(4)转化为

$$\min_{Y_i, Y_i, G_i, Q_{l,t}, Z_i} \mathcal{Y}_i, \text{ s t } (19) \sim (21). \quad (22)$$

这一转化过程的基本原理可参见文献[5~7]中的应用实例.采用如下LM I代替约束条件(11):

$$\begin{bmatrix} G_{i+1} + G_{i+1}^T - Q_{l,i} & * \\ A_i G_{i+1} + B_i Y_{i+1} & Q_{l,t} \end{bmatrix} 0,$$

$$l = 1, 2, \dots, L, t = 1, 2, \dots, L. \quad (23)$$

与式(16)和(17)相比,由于式(22)和(23)用 $Q_{l,t} (l = 1, 2, \dots, L)$ 替换唯一的 Q_i ,故可改善控制器的可行性和最优性(参见文献[8,9]及其仿真例子).采用参数Lyapunov函数后,对应于 $F_i = Y_i G_i^{-1}$ 的吸引域将是 $\mathcal{E}_i = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x^T Q_{l,i}^{-1} x = 1, l = 1, 2, \dots, L\}$,它一般不是椭圆型的.

算法2

1) 离线确定一系列状态点 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$,这些状态点从远离原点处逐渐靠近原点.求解式(22)得到相应的 $\{Q_{l,i}, G_i, Y_i\}$,这样可得到集合 \mathcal{E}_i 和控制律 $F_i = Y_i G_i^{-1}, i = 1, 2, \dots, N$.

2) 对于每个 $x_i (i \in \mathbb{N})$,如果式(23)成立,则每个时刻 k 在线地采用如下控制律:

$$F(k) = \begin{cases} F(\alpha(k)), & x(k)^T Q_{l,i}^{-1} = 1, \\ & \forall l = 1, \dots, L, \\ & x(k)^T Q_{l_1, i+1}^{-1} > 1, \\ & \exists l_1 \in \{1, \dots, L\}, i \in \mathbb{N}; \\ F_N, & x(k)^T Q_{l_N}^{-1} = 1, \\ & \forall l = 1, \dots, L. \end{cases} \quad (24)$$

其中: $F(\alpha(k)) = \alpha(k)F_i + (1 - \alpha(k))F_{i+1}, 0 < \alpha(k) < 1$;并且存在 $\{l_2, l_3\} \subseteq \{1, 2, \dots, L\}$,使得

$$x(k)^T [\alpha(k)Q_{l_2, i}^{-1} + (1 - \alpha(k))Q_{l_3, i+1}^{-1}]x(k) = 1; \quad (25a)$$

$$x(k)^T [\alpha(k)Q_{l_2, i}^{-1} + (1 - \alpha(k))Q_{l_3, i+1}^{-1}]x(k) = 1; \forall l = 1, \dots, L; \quad (25b)$$

$$x(k)^T [\alpha(k)Q_{l_2, i}^{-1} + (1 - \alpha(k))Q_{l_3, i+1}^{-1}]x(k) = 1, \forall l = 1, \dots, L. \quad (25c)$$

已知 $x^T [\alpha(k)Q_{l_2, i}^{-1} + (1 - \alpha(k))Q_{l_3, i+1}^{-1}]x = 1$ 的解为

$$\alpha(k) = \frac{1 - x^T Q_{l_3, i+1}^{-1} x}{x^T (Q_{l_2, i}^{-1} - Q_{l_3, i+1}^{-1}) x}$$



以一定的顺序取 $l_2, l_3 \in \{1, 2, \dots, L\}$, 求得 $\alpha(k)$ 并代入式 (25b) 和 (25c), 使两个不等式条件全部成立的 $\alpha(k)$ 即可用于控制律的计算

类似于文献[4], 有如下结论:

定理 1 算法 2 中所实现的状态反馈控制律是状态 x 的连续函数 给定初始状态 $x(0)$ 满足 $x(0) \in \mathcal{E}_1$, 则算法 2 渐近镇定闭环系统

证明 由于集合 \mathcal{E} 是凸的, 在每个时刻 k , 条件 (25a) ~ (25c) 保证了 $\alpha(k)$ 必有唯一解 当 $x(k)$ 在 \mathcal{E}_i 边界上时, $\alpha(k) = 1$ 且 $F(\alpha(k)) = F_i$; 当 $x(k)$ 在 \mathcal{E}_{i+1} 边界上时, $\alpha(k) = 0$ 且 $F(\alpha(k)) = F_{i+1}$. 这说明算法 2 中所实现的状态反馈控制律是状态 x 的连续函数 当状态位于 \mathcal{E}_i 和 \mathcal{E}_{i+1} 之间时, 记 $Q_l(\alpha(k))^{-1} = \alpha(k)Q_{l,i}^{-1} + (1 - \alpha(k))Q_{l,i+1}^{-1}$, $Z(\alpha(k)) = \alpha(k)Z_i + (1 - \alpha(k))Z_{i+1}$, $l = 1, 2, \dots, L$. 考虑式 (17) 与 (11) 的等价性, 当同时满足式 (23) 和 (19) 时, 有

$$\begin{bmatrix} Q_{l,i}^{-1} & * \\ A_{i+1} + B_i F(\alpha(k)) & Q_{l,i+1} \end{bmatrix} \preceq 0, \quad \forall l = 1, 2, \dots, L, t = 1, 2, \dots, L;$$

当式 (21) 对 i 和 $i+1$ 同时满足时, 可得到

$$\begin{bmatrix} Z(\alpha(k)) & * \\ F(\alpha(k))^T & Q_l(\alpha(k))^{-1} \end{bmatrix} \preceq 0, \quad \forall l = 1, 2, \dots, L.$$

这说明状态反馈控制律 $u(k) = F(\alpha(k))x(k)$ 将使未来的状态保持在 \mathcal{E}_i 内部并向 \mathcal{E}_{i+1} 收敛, 同时满足约束 根据文献[4], 可知闭环系统稳定

注 1 在算法 2 中, 条件 (25b) 和 (25c) 主要是为构造关于 x 连续的控制律而设置的 如果组成 \mathcal{E}_{i+1} 的 L 个椭圆都位于 \mathcal{E}_i 内部, 则条件 (25b) 和 (25c) 可以去掉, 这时系统仍是闭环稳定的 在实际应用中, 为得到更快的闭环响应, 可保留式 (25c) 而将 (25b) 替换为

$$x(k)^T [\alpha(k)Q_{l_2,i}^{-1} + (1 - \alpha(k))Q_{l_2,i+1}^{-1}] x(k) \leq 1, \quad \forall l = 1, 2, \dots, L. \quad (25d)$$

易知, 采用式 (25c) 和 (25d) 时, 得到的 $\alpha(k)$ 一般满足 $0 < \alpha(k) < 1$, 且系统闭环稳定

4 仿真验证

采用系统

$$\begin{bmatrix} x^{(1)}(k+1) \\ x^{(2)}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ K(k) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{(1)}(k) \\ x^{(2)}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(k),$$

其中 $K(k)$ 为不确定参数 取加权矩阵 $Q = I$, $R = 1$, 并取输入约束 $|u| \leq 1$, 初始状态 $x(0) = [7, 80]^T$. 考虑如下两种情况:

1) 取 $K(k) = [1, K_M]$, 变化 K_M . 当 $K_M = 49.4$ 时, 算法 1 不再可行, 但当 $K_M = 50.2$ 时, 算法 2 仍然可行, 这说明算法 2 对可行性有所改进

2) $K(k) = [0.5, 2.5]$, 真实状态由 $K(k) = 1.5 + \sin(k)$ 产生 取 $x_i^{(1)} = x_i^{(2)} = \xi_i$, $\xi_1 = 10$, $\xi_2 = 8$, $\xi_3 = 6$, $\xi_4 = 4$, $\xi_5 = 3$, $\xi_6 = 2$, $\xi_7 = 1.5$, $\xi_8 = 1$, $\xi_9 = 0.75$, $\xi_{10} = 0.5$. 采用算法 1 和算法 2, 得到的 Y_i 分别为

- [1 462 744, 521 457, 141 341, 23 950,
- 7 144, 1 417, 481, 116, 46, 14],
- [1 413 608, 501 378, 135 461, 22 876,
- 6 846, 1 374, 474, 116, 45, 13]

采用算法 2 时, 用式 (25d) 替换 (25b), 计算 $\alpha(k)$ 时同时满足式 (25a), (25c) 和 (25d). 闭环状态轨迹如图 1 所示, 其中虚线表示算法 1, 实线表示算法 2

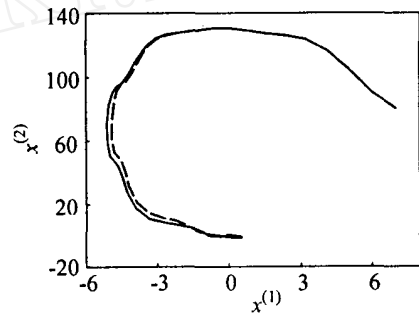


图 1 闭环系统的状态轨迹

记 $J_{\text{true}} = \sum_{i=0}^{\infty} [x^{(1)}(i)^2 Q + u(i)^2 R]$, 且其优化值为 J_{true}^* . 对于算法 1, $J_{\text{true}}^* = 293.284$; 对于算法 2, $J_{\text{true}}^* = 289.302$. 仿真结果表明算法 2 对最优性也有所改进

5 结 论

本文对文献[4]的鲁棒预测控制的离线算法提出了改进方案, 通过引入参数 Lyapunov 函数, 使得原来需要二次稳定的控制器经改造后只需多包二次稳定 改进的控制器可给出更优的控制作用, 适用范围更广泛 此外, 改进的控制器保持了原有控制器的稳定性以及控制律相对于系统状态的连续性 离线算法只需很小的在线计算量, 而采用参数 Lyapunov 函数也只是使在线计算量略有增加, 远远小于在线算法^[2,6,9]的计算量, 所以离线算法适合在工程实际中采用

(下转第 320 页)

可利用过程的动态信息获得其稳态模型,以便得到其最佳设定值 文献[1~3]虽然提出了解决问题的方法,但都存在很大的弱点 本文就如何克服文献[4]的弱点,在文献[5~8]的基础上,针对伴有噪声的动态线性大工业过程,采用分散辨识方法获取其稳态模型的强一致性估计,并且给出了稳态模型可辨识的条件

参考文献(References)

- [1] Bamnolker W, Isemann R. Adaptive on-line steady-state optimization of slow dynamic processes [J]. *Automatica*, 1978, 14: 223-230
- [2] Garcia C E, Morari M. Optimal operation of integrated processing systems — Part I: Open-loop optimizing control [J]. *AIChE J*, 1981, 27(6): 960-968
- [3] Lin J, Wang M, Roberts P D, et al. Hierarchical integrated identification and optimization for on-line stochastic optimizing control of large-scale steady-state industrial processes [J]. *Int J Control*, 1991, 53(1): 1-44
- [4] 陈庆升, 万百五. 利用工业过程稳态信息建立稳态模型及其强一致性分析 [J]. *控制与决策*, 1991, 6(2): 90-96 (Chen Q S, Wan B W. Steady-state model establishment of industrial process by use of dynamic information and analysis: SISO case [J]. *Control and Decision*, 1991, 6(2): 90-96)
- [5] 黄正良, 万百五, 韩崇昭. 双线性系统稳态模型估计及其强一致分析 [J]. *自动化学报*, 1995, 21(5): 562-569 (Huang Z L, Wan B W, Han C Z. An approach to estimate steady-state models of bilinear systems and its strong consistency [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1995, 21(5): 562-569)
- [6] 黄正良, 万百五, 韩崇昭. 辨识 Hammerstein 模型的两步法 [J]. *控制理论与应用*, 1995, 12(1): 34-39 (Huang Z L, Wan B W, Han C Z. A two-stage identification technique for Hammerstein model [J]. *Control Theory and Applications*, 1995, 12(1): 34-39)
- [7] 黄正良, 吴坚, 万百五. 辨识 Wiener 模型的一种新方法 [J]. *控制理论与应用*, 1996, 13(3): 1-4 (Huang Z L, Wu J, Wan B W. A new method of identifying Wiener model [J]. *Control Theory and Applications*, 1996, 13(3): 1-4)
- [8] 刘知贵, 黄正良. 大工业过程稳态模型的分散辨识 [J]. *电子科技大学学报*, 1999, 28(3): 286-290 (Liu Z G, Huang Z L. Decentralized identification of steady-state models for large-scale industry process [J]. *J of University of Electronic Science and Technology*, 1999, 28(3): 286-290)

(上接第315页)

参考文献(References)

- [1] Wan Z, Kothare M V. Efficient robust constrained model predictive with a time varying terminal constraint set [J]. *Systems and Control Letters*, 2003, 48(3): 375-383
- [2] Kothare M V, Balakrishnan V, Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities [J]. *Automatica*, 1996, 32(11): 1361-1379
- [3] Wan Z, Kothare M V. Robust output feedback model predictive control using off-line linear matrix inequalities [J]. *J of Process Control*, 2002, 12(5): 763-774
- [4] Wan Z, Kothare M V. An efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities [J]. *Automatica*, 2003, 39(6): 837-846
- [5] Daafouz J, Bernussou J. Parameter dependent Lyapunov functions for discrete time systems with time varying parameter uncertainties [J]. *Systems and Control Letters*, 2001, 43(3): 355-359
- [6] Mao W J. Robust stabilization of uncertain time-varying discrete systems and comments on "an improved approach for constrained robust model predictive control" [J]. *Automatica*, 2003, 39(12): 1109-1112
- [7] Ding B C, Xi Y G, Li S Y. A synthesis approach of on-line constrained robust model predictive control [J]. *Automatica*, 2004, 40(1): 163-167
- [8] de Oliveira M C, Bernussou J, Geromel J C. A new discrete-time robust stability condition [J]. *Systems and Control Letters*, 1999, 37(2): 261-265
- [9] Cuzzola F C, Geromel J C, Morari M. An improved approach for constrained robust model predictive control [J]. *Automatica*, 2002, 38(8): 1183-1189