

区间时滞相关离散非线性系统的鲁棒模型预测控制

赵杰梅¹, 胡忠辉², 张利军³

(1. 武汉轻工大学 数学与计算机学院, 武汉 430023; 2. 中船重工 第709
研究所, 武汉 430074; 3. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘要: 针对一类带有扰动、输入约束和凸多面体不确定性的区间时滞离散非线性系统, 提出一种鲁棒模型预测控制方法. 一方面, 利用 min-max 模型预测控制求解鲁棒模型预测控制器, 以研究鲁棒预测控制在范数有界意义下的扰动抑制问题; 另一方面, 充分利用时滞的上下界信息构造 Lyapunov 函数以得到控制器存在的充分条件. 最后给出了闭环系统鲁棒稳定性证明.

关键词: 离散非线性系统; 预测控制; 区间时滞相关; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Robust model predictive control for discrete-time nonlinear systems with delay-range-dependent

ZHAO Jie-mei¹, HU Zhong-hui², ZHANG Li-jun³

(1. School of Mathematic and Computer Science, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. 709th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Wuhan 430074, China; 3. School of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: ZHAO Jie-mei, E-mail: jiemeizhao@163.com)

Abstract: A robust model predictive control method is proposed for a class of discrete-time nonlinear systems with interval time-delay, perturbation, input constraint and polytopic-type uncertainties. Based on the min-max model predictive control method, the robust model predictive controller is obtain. Then the disturbance rejection of the robust model predictive control in the sense of normbounded is studied. Besides, the informations of the upper and lower bounds of delay are applied to construct the Lyapunov function for obtaining the existence of the controller. Finally, the asymptotic stability of close-looped system is proved.

Keywords: discrete-time nonlinear systems; predictive control; delay-range-dependent; linear matrix inequality

0 引言

模型预测控制作为20世纪70年代后期在工业过程控制领域内发展起来的一类新型计算机控制算法, 已被工业界广泛应用^[1-2]. 在实际工业过程中无法预知各种不确定因素以及模型失配的影响, 所以设计控制器会带有很大的误差, 而鲁棒预测控制是一种包含鲁棒控制和预测控制的滚动优化思想, 可以很好地处理模型不确定性问题, 因此可提高控制性能.

为了研究并提高模型预测控制在约束和不确定性存在时的可行性和鲁棒性, 采用了 min-max 鲁棒预测控制方法, 该控制方法研究的是在系统不确定性

最坏情况下的模型预测控制可行性及其闭环系统鲁棒性问题^[3-11]. 例如, 文献[3]对具有状态和输入时滞的不确定广义系统进行研究, 通过近似求解无穷时域二次性能指标提出了一种鲁棒预测控制算法; 文献[4]应用鲁棒模型预测控制方法对一类具有非线性扰动的多重时滞不确定系统进行研究; 文献[5-7]研究了输入带有约束的离散时滞系统的鲁棒模型预测控制问题, 但是所考虑的系统是常数时滞; 文献[8-9]应用预测控制解决了时滞系统的控制问题, 但没有考虑不确定性; 文献[10]研究了带有输入约束的时变时滞系统的鲁棒预测控制问题, 但是没有充分利用时滞的

收稿日期: 2013-09-21; 修回日期: 2014-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174047); 西北工业大学基础研究基金项目(JC201230); 武汉轻工大学引进(培养)人才科研启动项目(2014RZ04).

作者简介: 赵杰梅(1984-), 女, 讲师, 博士, 从事预测控制、非线性系统控制的研究; 张利军(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统控制等研究.

上下界信息构造 Lyapunov 函数, 所设计的 Lyapunov 函数忽略了时滞的界对系统的影响, 从而增加了系统的保守性; 文献 [11] 基于 LMI 研究了容许扰动下的多面体描述系统的鲁棒离散非线性预测控制问题. 上述文献只针对系统中的有界扰动或时滞进行分析和控制, 具有一定的局限性. 而实际系统经常是同时具有时滞和非线性扰动的, 因此有必要对此类系统进行鲁棒预测控制.

本文讨论具有输入约束、扰动和时变时滞的离散非线性系统的鲁棒模型预测控制设计问题, 提出了基于 LMI 的鲁棒模型预测控制方法. 充分利用时滞的上下界信息构造 Lyapunov 函数, 利用 LMI 技术和 min-max 模型预测控制方法, 给出了一种设计鲁棒模型预测控制器的新方法. 所设计的控制器在每一个采样时刻, 满足:

- 1) 对系统的性能指标进行优化;
- 2) 控制输入满足约束条件;
- 3) 闭环系统鲁棒稳定.

为验证所提出的鲁棒模型预测控制方法的有效性, 最后给出了一个数值仿真.

1 问题描述和预备知识

符号说明: A^T 表示矩阵 A 的转置; $P > 0$ ($P \geq 0$) 表示 P 是正定(半正定)对称矩阵; $x(k+i|k)$ 表示 k 时刻对 $k+i$ 时刻 x 的预测, 并且有 $x(k-i|k) = x(k-i)$, $i \geq 0$.

考虑如下带有扰动和输入约束的凸多面体不确定时变时滞离散非线性系统:

$$\begin{aligned} x(k+1) = & \\ & A(k)x(k) + A_d(k)x(k-d(k)) + \\ & B(k)u(k) + f(x(k), x(k-d(k))). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in R^n$ 是系统的状态; $u(k) \in R^m$ 是系统的输入, 输入约束为

$$-\bar{u} \leq u(k) \leq \bar{u}, \quad k = 0, 1, \dots; \quad (2)$$

$f(k) := f(x(k), x(k-d(k)))$ 是非线性扰动, 并且是 Lipschitz 非线性函数, 满足

$$f^T(k)f(k) \leq$$

$$\beta_1^2 x^T(k)x(k) + \beta_2^2 x^T(k-d(k))x(k-d(k)), \quad (3)$$

$d(k)$ 表示系统的时滞, 满足

$$0 < d_1 \leq d(k) \leq d_2, \quad (4)$$

d_1 和 d_2 都是正整数, $x(k) = \phi(k)$ ($-d_2 \leq k \leq 0$) 是系统的初始条件, $\bar{u} = [\bar{u}_1, \dots, \bar{u}_m]$ 且 $\bar{u}_i > 0$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 是输入约束的边界值. 系统(1)的系统矩阵是未知的, 并且可以表示成凸组合形式, 即

$$[A(k), A_d(k), B(k)] \in \Omega =$$

$$\text{Co}\{[A_1, A_{d1}, B_1], \dots, [A_p, A_{dp}, B_p]\}. \quad (5)$$

其中: Co 表示由 p 个顶点 $[A_1, A_{d1}, B_1], \dots, [A_p, A_{dp}, B_p]$ 构成的凸多面体集, 即存在 p 个非负系数 $0 \leq \lambda_i(k) \leq 1$, $i = 1, 2, \dots, p$, 使得

$$[A(k), A_d(k), B(k)] = \sum_{i=1}^p \lambda_i(k)[A_i, A_{di}, B_i],$$

$$\sum_{i=1}^p \lambda_i(k) = 1.$$

针对不确定时滞离散系统(1)的模型预测控制问题可描述为 min-max 优化问题, 即设计鲁棒预测控制器使不确定系统鲁棒稳定并且获取如下的鲁棒性能指标, 即需要考虑 min-max 优化问题

$$\min_{u(k+i|k), i \geq 0} \max_{[A(k+i), A_d(k+i), B(k+i)] \in \Omega, i \geq 0} J(k), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} J(k) = & \sum_{i=0}^{\infty} x^T(k+i|k)Qx(k+i|k) + \\ & \sum_{i=0}^{\infty} u^T(k+i|k)Ru(k+i|k), \end{aligned} \quad (7)$$

$$x(k+i+1|k) =$$

$$\begin{aligned} & Ax(k+i|k) + A_dx(k+i-d|k) + \\ & Bu(k+i|k) + f(k+i|k), \end{aligned} \quad (8)$$

$$-\bar{u} \leq u(k+i|k) \leq \bar{u}, \quad k = 0, 1, \dots. \quad (9)$$

其中: $Q > 0$, $R > 0$ 分别为性能指标中状态的加权矩阵和控制量的加权矩阵. 在 min-max 优化问题(6)~(9)中, 式(7)表示未来控制输入的无限时域和系统预测状态的二次鲁棒性能指标, 式(8)表示系统的状态预测模型, 式(9)表示系统的控制输入约束. 针对系统(1), 设计如下状态反馈控制律:

$$u(k+i|k) = Lx(k+i|k). \quad (10)$$

本文的控制目标是求得鲁棒模型的预测控制器中的增益矩阵 L , 并要求控制输入 $u(k+i|k)$ ($i \geq 0$) 使得闭环系统渐近稳定. 具体做法是设计状态反馈控制器(10), 并将其代入 min-max 优化问题(6)~(9)中, 因此需将无限时域 min-max 优化问题(6)~(9)转化为带有 LMI 约束的凸优化问题, 再根据模型预测控制基本原理, 在时刻 k 只执行控制输入 $u(k|k) = L(k) \times x(k|k)$, 在 $k+1$ 时刻用最新状态信息重新求解优化问题. 最优化问题(6)~(9)是一个 min-max 优化问题, \max 运算是在 Ω 中找到 $[A(k+i), A_d(k+i), B(k+i)] \in \Omega$, 即基于多面体 Ω 内所有系统矩阵寻找最大的目标函数 $J(k)$ (或者称 $J(k)$ 的最坏值). 通过寻找 $u(k+i|k)$ 最小化该最坏值, 并且应用最小化目标函数 $J(k)$ 的最坏值的上界取代最小化目标函数 $J(k)$ 的最坏值,

其中

$$\begin{aligned} \sigma &= 1, 2, \dots, p, d_{12} = d_2 - d_1, \\ \eta(k|k) &= [x^T(k|k), \dots, x^T(k - d_2|k), \\ &\quad y^T(k - 1|k), \dots, y^T(k - d_2|k)], \\ \Lambda &= \text{diag}\left\{P, \frac{R_1}{(d_{12} + 1)}, \dots, \frac{R_1}{(d_{12} + 1)}, \frac{R_1}{d_{12}}, \right. \\ &\quad \left. \dots, R_1, \frac{Z}{d_2}, \frac{Z}{(d_2 - 1)}, \dots, Z\right\}. \end{aligned}$$

则鲁棒模型预测控制律 $u(k + i|k) = YX^{-1}x(k + i|k)$ ($i \geq 0$) 将最小化最坏情况下的鲁棒性能指标上界 γ .

证明 取 Lyapunov 函数 (11), 对其求差分, 有

$$\Delta V(k + i|k) \leq \xi^T(k + i|k) \Psi_1 \xi(k + i|k). \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} \xi^T(k + i|k) &= \\ & \left[x^T(k + i|k), x^T(k + i - d(k)|k), \right. \\ & \left. f^T(k + i|k), \sum_{j=k-d_2}^{k-1} y^T(j + i|k) \right]^T, \end{aligned}$$

$$\Psi_1 = \Pi_1^T P \Pi_1 + d_2 \Pi_2^T Z \Pi_2 +$$

$$\begin{bmatrix} -P + (d_{12} + 1)R_1 & * & * & * \\ 0 & -R_1 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & * \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{d_2}Z \end{bmatrix}.$$

令

$$\begin{aligned} W_0(k + i|k) &= \\ \Delta V(k + i|k) &+ x^T(k + i|k) Q x(k + i|k) + \\ u^T(k + i|k) R u(k + i|k) &= \\ \xi^T(k) \Psi_2 \xi(k), \end{aligned}$$

其中 $\Psi_2 = \Psi_1 + \text{diag}\{Q + L^T R L, 0, 0, 0\}$. 又因为式 (3) 可以写成

$$W_1(k + i|k) = \xi^T(k) \Psi_3 \xi(k), \quad (23)$$

其中 $\Psi_3 = \text{diag}\{-\beta_1^2 I, -\beta_2^2 I, I, 0\}$.

根据引理 2, 存在数值 $\rho > 0$ 使得 $W_0(x) - \rho W_1(x) < 0$ 成立, 则 $W_0(x) < 0$, 即

$$\Psi_3 - \rho \Psi_2 < 0. \quad (24)$$

根据 Schur 补引理, 式 (24) 成立等价于

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & * & * & * & * & * \\ 0 & \Phi_{22} & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\rho I & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{d_2}Z & * & * \\ \Phi_{15} & P A_d(k + i) & P & 0 & -P & * \\ \Phi_{16} & Z A_d(k + i) & Z & 0 & 0 & -Z \end{bmatrix} < 0. \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= (d_{12} + 1)R_1 - P + Q + L^T R L + \rho \beta_1^2 I, \\ \Phi_{22} &= -R_1 + \rho \beta_2^2 I, \\ \Phi_{15} &= P[A(k + i) + B(k + i)L], \\ \Phi_{16} &= Z[A(k + i) + B(k + i)L - I]. \end{aligned}$$

令 $X = \gamma P^{-1}$, $S = \gamma R_1^{-1}$, $U = \gamma Z^{-1}$, 并将式 (25) 分别左乘和右乘矩阵 $\gamma^{1/2} \text{diag}\{P^{-1}, R_1^{-1}, I, Z^{-1}, P^{-1}, Z^{-1}\}$, 根据 $L = YX^{-1}$ 及凸集的基本性质, 可得式 (19) 成立.

下面将证明不等式 (20) 成立. 根据式 (11), 可得

$$V(x(k|k)) = \sum_{i=1}^4 V_i(x(k|k)) = \eta^T(k|k) \bar{\Lambda} \eta(k|k). \quad (26)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{\Lambda} &= \text{diag}\{X, (d_{12} + 1)S, \dots, (d_{12} + 1)S, \\ &\quad d_{12}S, \dots, S, d_2U, (d_2 - 1)U, \dots, U\}. \end{aligned}$$

根据式 (13) 和 (26), 可得

$$V(x(k|k)) = \eta^T(k|k) \Lambda_4 \eta(k|k) \leq \gamma, \quad (27)$$

应用 Schur 补, 式 (27) 可进一步表示为

$$\begin{bmatrix} \gamma & * \\ \eta(k|k) & \Lambda_4^{-1} \end{bmatrix} \geq 0. \quad (28)$$

注意到 $X = \gamma P^{-1}$, $S = \gamma R_1^{-1}$, $U = \gamma Z^{-1}$, 则式 (28) 与 (20) 等价.

下面考虑如何处理约束问题. 为了将输入约束条件 (9) 转化成 LMI 形式, 引入下面的不变椭圆:

$$\omega = \{z^T \Lambda^{-1} z \leq 1\}. \quad (29)$$

其中

$$\begin{aligned} z &= [x^T(k + i|k), \dots, x^T(k + i - d_2|k), \\ &\quad y^T(k + i - 1|k), \dots, y^T(k + i - d_2|k)], \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} \max_{i \geq 0} |u_j(k + i|k)|^2 &= \max_{i \geq 0} |(YX^{-1}x(k + i|k))_j|^2 \leq \\ \max_{i \geq 0} |(\bar{Y} \Lambda^{-1} z)_j|^2 &\leq (\bar{Y} \Lambda^{-1} \bar{Y}^T)_{jj}, \end{aligned}$$

$\bar{Y} = [Y \ 0 \ \dots \ 0]$, 一定存在对称矩阵 E 使得

$$\begin{bmatrix} E & \bar{Y} \\ \bar{Y}^T & \Xi \end{bmatrix} \geq 0, \quad E_{jj} \leq \bar{u}_j^2, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (30)$$

再根据 \bar{Y} 和 Ξ 的定义, 容易得到式 (30) 与 (21) 等价.

综上, 定理 1 得证. \square

2.2 控制算法

综合上面的控制器设计过程, 对应于定理 1 给出如下控制算法.

算法 1 不确定时滞系统 (1) 的状态反馈鲁棒模型预测控制算法.

Step 1: 测量当前时刻系统的状态 $x(k)$, 并获得过

去时刻的状态 $x(k-1), \dots, x(k-d(k))$;

Step 2: 令 $x(k|k) = x(k), x(k-1|k) = x(k-1), \dots, x(k-d(k)|k) = x(k-d(k))$;

Step 3: 选择适当的对称正定矩阵 Q 和 R ;

Step 4: 定义优化问题 (18)~(21) 中的各个变量, 标量 $\gamma > 0, \rho > 0$, 正定对称矩阵 X, S 和 U , 适当维数矩阵 Y ;

Step 5: 用 Matlab 中的 LMI 工具箱求解优化问题 (18)~(21), 得到最优解 γ, ρ, X, Y, S, U ;

Step 6: 计算出状态反馈预测控制器增益矩阵 $L = YX^{-1}$;

Step 7: 将 k 时刻的控制器 $u(k) = Lx(k|k)$ 作用于被控系统 (1);

Step 8: 令 $k = k + 1$, 重复 Step 1~Step 7.

2.3 可行性和稳定性分析

定理 2 对于离散时变时滞系统 (1), 若在 k 时刻基于 LMI 的优化问题 (18)~(21) 存在可行解, 则在 $k+1$ 时刻也存在可行解, 并且所提出的鲁棒模型预测算法使得闭环系统是鲁棒稳定的.

证明 可行性显然, 下面只需对稳定性进行分析.

式 (20) 是凸优化问题, 所以存在唯一最优解. 假设 $P(k), R_1(k), Z(k)$ 和 $P(k+1), R_1(k+1), Z(k+1)$ 分别表示最优优化问题 (18)~(21) 在 k 时刻和 $k+1$ 时刻的最优解, 则式 (20) 在任何的 $k+i (i > 0)$ 时刻, $P(k), R_1(k), Z(k)$ 都是可行解, 因此

$$\begin{aligned}
 & x^T(k+1|k)P(k)x(k+1|k) + \\
 & \sum_{j=k-d(k)}^{k-1} x^T(1+j|k)R_1(k)x(1+j|k) + \\
 & \sum_{j=-d_2+1}^{d_1} \sum_{s=k+j}^{k-1} x^T(1+s|k)R_1(k)x(1+s|k) + \\
 & \sum_{j=-d_2}^{-1} \sum_{s=k+j}^{k-1} y^T(1+s|k)Z(k)y(1+s|k) \leq \\
 & x^T(k|k)P(k)x(k|k) + \\
 & \sum_{j=k-d(k)}^{k-1} x^T(j|k)R_1(k)x(j|k) + \\
 & \sum_{j=-d_2+1}^{d_1} \sum_{s=k+j}^{k-1} x^T(s|k)R_1(k)x(s|k) + \\
 & \sum_{j=-d_2}^{-1} \sum_{s=k+j}^{k-1} y^T(s|k)Z(k)y(s|k). \tag{31}
 \end{aligned}$$

对于任意 $[A(k) A_d(k), B(k)] \in \Omega$, 由式 (31) 可知

$$V(x(k+1|k+1)) - V(x(k|k)) \leq 0. \tag{32}$$

式 (32) 说明 $V(k|k)$ 是单调非增且有界的 Lyapunov 函数, 当 $k \rightarrow \infty$ 时, 有 $x(k) \rightarrow 0$. 根据离散 Lyapunov 稳定性理论可以说明闭环系统鲁棒稳定.

3 仿真结果与分析

本文给出一个数值例子来说明所提出鲁棒模型预测控制方法的有效性.

例 1 考虑带有输入约束、非线性扰动和凸多面体不确定的时变时滞离散非线性系统

$$\begin{aligned}
 x(k+1) = & \\
 & A(k)x(k) + A_d(k)x(k-d(k)) + \\
 & B(k)u(k) + f(x(k), x(k-d(k))).
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 & [A(k), A_d(k), B(k)] = \\
 & \text{Co}\{[A_1, A_{d1}, B_1], [A_2, A_{d2}, B_2]\}f(k) = \\
 & [0, 0.3x_2(k) + 0.2x_1(k-d(k))], \\
 & A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1.2 \\ 1 & -1.5 \end{bmatrix}, A_{d1} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 \\ 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1.1 \\ 1.3 \end{bmatrix}, \\
 & A_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 \\ 0.8 & -1.9 \end{bmatrix}, A_{d2} = -\begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 \\ 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1.2 \\ 1.5 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

假设初始状态为 $x(-2) = x(-1) = x(0) = [1, 1]^T$. 根据式 (3), 取 $\beta_1 = 0.3, \beta_2 = 0.2$, 非线性扰动满足式 (3), 要求设计控制器使得 $\|u(k)\| \leq 2$, 并且满足性能指标要求. 时滞上下界分别为 $d_2 = 5, d_1 = 1$; 权重矩阵分别为 $Q = I, R = 1$; 凸多面体中 $\lambda_1 = 0.35, \lambda_2 = 0.65$; 则可得到 $\gamma = 16.634$. 图 1 给出了状态 $x_1(k)$ 和 $x_2(k)$ 的变化曲线, 在控制器的作用下系统是稳定的. 图 2 是控制器曲线图, 可以看出控制始终满足输入约束.

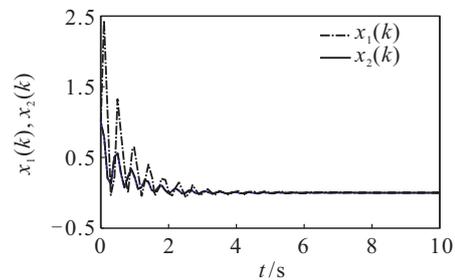


图 1 状态 $x_1(k)$ 和 $x_2(k)$ 的时间响应曲线

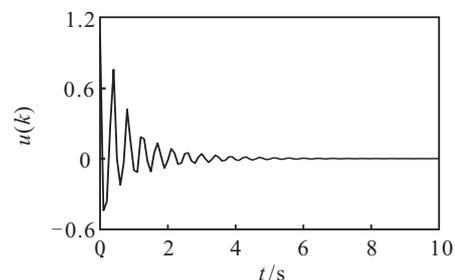


图 2 控制输入 $u(k)$

4 结 论

本文提出了一种鲁棒预测控制算法,解决了带有输入约束和扰动的不确定区间时滞离散非线性系统控制问题. 所提出的控制算法采用状态反馈控制结构,应用变量变换的思想和LMI技术,得到鲁棒模型预测控制器. 所构造的Lyapunov函数充分利用了时滞的上下界信息,得到了反馈控制律存在的新判据,并且分析了控制算法的可行性,证明了系统的鲁棒性. 仿真结果验证了本文控制算法的有效性.

参考文献(References)

- [1] 何德峰, 丁宝苍, 于树友. 非线性系统模型预测控制若干基本特点与主题回顾[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(3): 273-287.
(He D F, Ding B C, Yu S Y. Review of fundamental properties and topics of model predictive control for nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(3): 273-287.)
- [2] 杨国诗, 何德峰, 薛美盛. 基于鲁棒控制Lyapunov函数的非线性预测控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(11): 1752-1756.
(Yang G S, He D F, Xue M S. Nonlinear predictive control based on robust control Lyapunov function[J]. Control and Decision, 2010, 25(11): 1752-1756.)
- [3] 刘晓华, 王利杰. 带有状态和输入时滞的不确定广义系统的鲁棒预测控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(4): 527-532.
(Liu X H, Wang L J. Robust predictive control of uncertain singular systems with both state and input delays[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(4): 527-532.)
- [4] 苏成利, 赵家程, 李平. 一类具有非线性扰动的多重时滞不确定系统鲁棒预测控制[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 644-649.
(Su C L, Zhao J C, Li P. Robust predictive control for a class of multiple time delay uncertain systems with nonlinear disturbance[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 644-649.)
- [5] Chen Q X, He D F, Yu L. Input-to-state stability of min-max MPC scheme for nonlinear time-varying delay systems[J]. Asian J of Control, 2012, 14(2): 489-501.
- [6] Shi Y J, Chai T J, Wang H, et al. Delay-dependent robust model predictive control for time-delay systems with input constraints[C]. Proc of American Control Conf. St Louis: IEEE Press, 2009: 4880-4884.
- [7] Kwon W H, Kang J W, Lee Y S, et al. A simple receding horizon control for state delayed systems and its stability criterion[J]. Journal of Process Control, 2003, 13(6): 539-551.
- [8] Kwon W H, Lee Y S, Han S H. General receding horizon control for linear time-delay systems[J]. Automatica, 2004, 40(9): 1603-1611.
- [9] Jeong S C, Park P. Constrained MPC Algorithm for uncertain time-varying systems with state-delay[J]. IEEE Trans on Automatica Control, 2005, 50(2): 257-262.
- [10] Li J X, Fang Y M, Shi S L. Robust MPC algorithm for discrete-time systems with time-varying delay and nonlinear perturbations[C]. Proc of the 29th Chinese Control Conf. Beijing: IEEE Press, 2010: 3128-3133.
- [11] 黄骅, 何德峰, 俞立. 基于多面体描述系统的鲁棒非线性预测控制[J]. 自动化学报, 2012, 38(12): 1906-1912.
(Huang H, He D F, Yu L. Robust nonlinear predictive control based on polytopic description systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(12): 1906-1912.)
- [12] Ma X J, Xiang S H, Xu B G, et al. H-infinity robust stability for uncertain systems with multiple time-varying delays and nonlinear perturbations[J]. J of Control Theory and Applications, 2006, 23(4): 631-635.

(责任编辑: 孙艺红)