

文章编号: 1001-0920(2009)02-0217-04

具有执行器饱和特性的不确定系统预测控制器设计

张宇献¹, 刘 民¹, 王建辉²

(1. 清华大学 自动化系, 北京 100084; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 针对具有执行器饱和特征的不确定系统, 提出了一种带有状态观测器的新型预测控制器设计方法. 该方法在滚动优化的每一步, 采用带有饱和特性的反馈控制结构得到一个最优控制律, 使无穷时域性能指标最小. 考虑在状态不完全已知的情况下, 设计了带有状态观测器的预测控制器, 并通过观测器参数调整使闭环系统渐近稳定. 通过仿真实验验证了所设计控制器的有效性.

关键词: 预测控制; 状态观测器; 执行器饱和; 不确定性; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of model predictive controller for uncertain systems with actuator saturation

ZHANG Yur-xian¹, LIU Min¹, WANG Jian-hui²

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: ZHANG Yur-xian, E-mail: zhangyuxian@mail.tsinghua.edu.cn)

Abstract: The design of novel model predictive controller with state observer is proposed for uncertain systems with actuator saturation. At each time step, the optimal control law that minimizes a infinite horizon objective function is obtained by applying a saturated feedback control structure. Then the observer is used when unknown state exists, and the model predictive controller with state observer is designed. The stability of close system is satisfied by adjusting the observer parameters. Finally, Simulation results show the effectiveness of model predictive controller with state observer.

Key words: Model predictive control; State observer; Actuator saturation; Uncertainty; Linear matrix inequalities

1 引 言

预测控制作为一种面向实际工业生产过程发展起来的先进控制技术, 具有控制性能好、鲁棒性强、能方便有效地处理输入输出约束等特点^[1,2], 正是这些特点使预测控制成为工程界广泛应用的一种先进控制方法. 但是在预测控制中用来描述被控系统动态特性的模型往往具有某种不确定性, 要保证实际控制效果, 处理模型不确定性问题便成为预测控制必须面对的一个现实问题. 为此, 国内外学者对预测控制理论和算法进行了深入的研究. 文献[3]提出了一种以若干个顶点矩阵的凸组合来描述不确定性的模型, 与范数有界描述不确定性相比, 用这种凸多面体描述不确定性是一种更为自然的描述方法, 具

有更少的保守性^[4]. [5]采用这种凸多面体不确定模型研究了一种基于 LMI 的鲁棒预测控制算法, 选择单个 Lyapunov 函数给出了一个系统鲁棒稳定的充分条件, 得到相应的控制律. [6]使用参数 Lyapunov 函数改进了[5]的方法. 在此基础上, [7,8]引入 N 个自由控制变量, 得到更加优化的控制律. 然而, 对于状态不完全已知情况的执行器饱和和系统预测控制的研究尚未见报道.

本文针对一类具有执行器饱和特性的凸多面体不确定系统, 提出了带有状态观测器的预测控制器设计方法. 在滚动优化的每一步采用带有饱和特性的反馈控制结构得到一个最优的控制律, 使无穷时域性能指标最小, 从而将预测控制器设计问题转化

收稿日期: 2007-12-25; 修回日期: 2008-03-12.

基金项目: 国家 973 计划项目(2002CB312202, 2009CB320602); 国家 863 计划项目(2006AA04Z163); 国家自然科学基金项目(60834004, 60721003); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目.

作者简介: 张宇献(1979—), 男, 沈阳人, 博士, 从事预测控制、智能优化控制的研究; 刘民(1965—), 男, 杭州人, 教授, 从事复杂生产过程的建模、优化和调度等研究.

为线性矩阵不等式的求解问题. 进一步考虑在状态不完全已知的情况下, 将状态观测器引入控制系统来观测系统的状态, 并通过调整观测器参数使闭环系统渐近稳定, 设计了带有状态观测器的新型预测控制器.

2 问题描述

考虑如下凸多面体不确定系统:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_k x_k + B_k u_k, \\ y_k &= C x_k, \\ [A_k \ B_k] & \end{aligned} \quad (1)$$

其中: A_k 和 B_k 为凸多面体不确定系数矩阵, $u \in \mathbb{R}^m$ 为控制变量, $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态变量, $y \in \mathbb{R}^l$ 为系统的输出. \mathcal{X} 为凸多面体集合, 满足

$$\text{Co}\{[A_1 \ B_1], [A_2 \ B_2], \dots, [A_L \ B_L]\}. \quad (2)$$

其中: $[A_i \ B_i]$ 是凸多面体 \mathcal{X} 的顶点, Co 是其中元素形成的凸包. 如果存在标量 $\alpha_i > 0$, 则有 $[A \ B]$

$$= \sum_{i=1}^L \alpha_i [A_i \ B_i], \quad \alpha_i = 1, 0 \leq \alpha_i \leq 1.$$

考虑饱和和反馈控制律

$$u_{k+i|k} = \text{sat}(F x_{k+i|k}), \quad i = 0, \quad (3)$$

使不确定系统(1) 渐近稳定. 其中 $\text{sat}(\cdot)$ 是幅值为1的饱和函数.

$$\text{sat}(u) = \begin{cases} 1, & u > 1; \\ u, & -1 \leq u \leq 1; \\ -1, & u < -1. \end{cases} \quad (4)$$

无穷时域性能指标函数

$$\begin{aligned} \min_{u_{k+i|k}} \max_{[A_k \ B_k]} J_k, \\ J_k = \sum_{i=0}^{\infty} \begin{bmatrix} x_{k+i|k} \\ u_{k+i|k} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q_i & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k+i|k} \\ u_{k+i|k} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $Q_i > 0, R > 0$. 假设在每一个采样时刻 k , 预测控制算法在线计算一个优化问题, 得到状态反馈控制律 $u_{k+i|k} = \text{sat}(F x_{k+i|k}), i = 0$, 使性能指标 J_k 最小. 并根据预测控制的特点, 将控制输入 $u_{k|k}$ 施加到被控对象中, 然后到下一时刻重新计算优化问题, 得到不同的控制输入, 这即是滚动优化^[9,10].

3 具有执行器饱和特性的预测控制器设计

3.1 基于饱和状态反馈的控制器设计

引理 1^[5] 考虑二次型函数 $V(x_{k|k}) = x_{k|k}^T P x_{k|k}, P > 0$, 满足如下条件:

$$\begin{aligned} V(x_{k+i+1|k}) - V(x_{k+i|k}) \\ - (x_{k+i|k}^T Q_1 x_{k+i|k} + u_{k+i|k}^T R u_{k+i|k}), \end{aligned} \quad (6)$$

则对于式(1) 所描述的不确定系统, 存在

$$\max_{[A_k \ B_k]} J_k = V(x_{k|k}). \quad (7)$$

由引理 1 可知, $V(x_{k|k})$ 是 J_k 的上界, 则最小化性能指标 J_k 可转化为对 $V(x_{k|k})$ 求最小.

令 D 是 $m \times m$ 维对角元素为 1 或 0 的对角矩阵的集合, 其中每一个元素表示为 $D_j, j = 1, 2, \dots, 2^m$. 令 $\bar{D}_j = I - D_j$, 那么, 如果 $D_j \in D$, 则 \bar{D}_j 也是 D 的元素.

引理 2^[11] 令 $u, v \in \mathbb{R}^m$ 且 $u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T, v = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$, 假设 $|v_i| \leq 1, \forall i = 1, \dots, m$, 则有

$$\text{sat}(u) \in \text{Co}\{D_j u + \bar{D}_j v \mid j = [1, 2^m]\}. \quad (8)$$

由引理 2, 假设反馈增益矩阵 $F, H \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 那么对于 $\forall x \in \{x \mid |Hx| \leq 1\}$, 存在 $\alpha_j > 0, j = 1, 2, \dots, 2^m$ 和矩阵 $H \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 使得

$$\text{sat}(Fx) = \sum_{j=1}^{2^m} \alpha_j (D_j F + \bar{D}_j H) x. \quad (9)$$

定理 1 在每一个采样时刻 k , 考虑具有执行器饱和特性的不确定系统(1), 如果存在一个常数 $\gamma > 0$, 矩阵 U, V 及对称正定矩阵 Q 和 G 满足下式:

$$\begin{aligned} \min_{Q, U, V}, \\ \text{s.t.} \begin{bmatrix} 1 & x_{k|k}^T \\ x_{k|k} & Q \end{bmatrix} \preceq 0; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} G + G^T - Q & * & * & * \\ A_i G + B_i (D_j U + \bar{D}_j V) & Q & * & * \\ Q^{\frac{1}{2}} G & 0 & I & * \\ R^{\frac{1}{2}} (D_j U + \bar{D}_j V) & 0 & 0 & L \end{bmatrix} \preceq 0, \quad (11)$$

$i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, 2^m;$

$$\begin{bmatrix} 1 & V_l \\ V_l^T & G + G^T - Q \end{bmatrix} \preceq 0, \quad l = 1, 2, \dots, m; \quad (12)$$

则有控制量 $u_k = \text{Sat}(U G^{-1} x_k)$ 使得 $V(x_{k|k})$ 最小.

证明 由于 $V(x_{k|k})$ 是性能指标(5) 的上界, 最小化 $V(x_{k|k})$ 可表示为

$$\begin{aligned} \min_{Q, U, V}, \\ \text{s.t.} \quad x_{k|k}^T P x_{k|k} \end{aligned} \quad (13)$$

令 $Q = P^{-1} > 0$, 式(13) 可写为

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{k|k}^T \\ x_{k|k} & Q \end{bmatrix} \preceq 0. \quad (14)$$

对于二次型函数 $V(x_k)$ 满足

$$\begin{aligned} V(x_{k+i+1|k}) - V(x_{k+i|k}) \\ - [x_{k+i|k}^T Q_1 x_{k+i|k} + \text{Sat}(F x_{k+i|k})^T R \text{Sat}(F x_{k+i|k})]. \end{aligned} \quad (15)$$

由引理 2 知, 如果存在矩阵 $H \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 使得

$$|H x_{k+i|k}| \leq 1, \quad (16)$$

那么, 饱和控制律可用式(9) 描述, 则式(15) 化为

$$\begin{aligned} x_{k|k}^T [A_{k+i} + B_{k+i} (D_j F + \bar{D}_j H)]^T \times \\ P [A_{k+i} + B_{k+i} (D_j F + \bar{D}_j H)] x_{k|k} - x_{k|k}^T P x_{k|k} \\ - [x_{k|k}^T Q_1 x_{k|k} + x_{k|k}^T (D_j F + \end{aligned}$$

$$D_j H)^T R(D_j F + D_j H) x_{k|k}],$$

$$i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, 2^m. \quad (17)$$

对于式(17)的系数矩阵 $[A_k B_k]$ 满足 $=$ $\text{Co}\{[A_1 B_1], [A_2 B_2], \dots, [A_L B_L]\}$, 如果存在 $Q > 0$, 由 Schur 补性质, 得

$$\begin{bmatrix} Q^{-1} & * & * & * \\ A_i + B_i(D_j F + D_j H) & Q & * & * \\ Q_i^\dagger & 0 & I & * \\ R_i^\dagger(D_j F + D_j H) & 0 & 0 & L \end{bmatrix} 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, 2^m. \quad (18)$$

将式(18) 分别左右乘以 $T = \text{diag}\{Q, I, I, I\}$, 得

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ A_i Q + B_i(D_j F + D_j H) Q & Q & * & * \\ Q_i^\dagger Q & 0 & I & * \\ R_i^\dagger(D_j F + D_j H) Q & 0 & 0 & L \end{bmatrix} 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, 2^m. \quad (19)$$

将式(19) 左右两边乘以 $\text{diag}\{GQ^{-1}, I, I, I\}$, 又因为 $0 < G + G^T - Q - G^T Q^{-1} G$ 成立^[6], 令 $F = UG^{-1}$, $H = VG^{-1}$, 有

$$\begin{bmatrix} G + G^T - Q & * & * & * \\ A_i G + B_i(D_j U + D_j V) & Q & * & * \\ Q_i^\dagger G & 0 & I & * \\ R_i^\dagger(D_j U + D_j V) & 0 & 0 & L \end{bmatrix} 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, 2^m. \quad (20)$$

因为不确定系统(1) 的状态变量满足椭圆不变集 $(P,) = \{x \in \mathbf{R}^n \mid x^T P x \leq 1\}$ ^[12], 即 $x_{k+i|k} \in$, 那么 $|Hx_{k+i|k}| \leq 1$ 等价于

$$h_l Q h_l^T \leq 1, l = 1, 2, \dots, m, \quad (21)$$

即

$$\begin{bmatrix} 1 & h_l \\ h_l^T & Q^{-1} \end{bmatrix} 0, l = 1, 2, \dots, m. \quad (22)$$

又因为 $V = HG$, 则有

$$\begin{bmatrix} 1 & V_l \\ V_l^T & G + G^T - Q \end{bmatrix} 0, l = 1, 2, \dots, m,$$

其中 V_l 是 V 的第 l 行.

3.2 带有观测器的新型预测控制器设计

考虑系统的状态不完全已知的情况, 构造状态观测器对系统的状态进行观测, 设计带有状态观测器的预测控制器. 这里假设标称系统的状态收敛于稳态状态时, 模型 $[A_k B_k]$ 收敛于标称系数矩阵 $[A_0 B_0]$, 观测器在稳态附近无模型失配. 从而, 可通过状态观测器对实际系统进行重构, 提高反馈控制性能.

设状态观测器具有如下形式:

$$\hat{x}_{k+1} = A_0 \hat{x}_k + B_0 u_k + L_0 (y_k - C \hat{x}_k). \quad (23)$$

其中: 状态观测器的初始状态 $\hat{x}_0 = 0$, L_0 为观测器增益矩阵.

定义观测器动态误差为 $e_k = x_k - \hat{x}_k$, 由不确定系统(1) 和状态观测器(23), 可得

$$e_{k+1} = x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} =$$

$$A_k x_k + B_k u_k - A_0 \hat{x}_k -$$

$$B_0 u_k - L_0 (C x_k - C \hat{x}_k) =$$

$$(A_0 - L_0 C) e_k + f(x_k, u_k). \quad (24)$$

这里把 $f(x_k, u_k) = (A_k - A_0) \hat{x}_k + (B_k - B_0) u_k$ 视为外部扰动信号.

定理 2 对于不确定系统(1) 和状态观测器(23), 如果存在常数 $0 < \alpha < 1$, 矩阵 W 和对称正定矩阵 Q , 使得

$$\begin{bmatrix} Q & Q A_0 - W C \\ A_0^T Q - C^T W^T & Q \end{bmatrix} 0, \quad (25)$$

则 $L_0 = Q^{-1} W$ 是状态观测器(23) 的一个增益矩阵.

证明 考虑闭环系统响应速度的影响, 引入状态变量的最小衰减律 $\|x_k\| \leq c^k \|x_0\|$, $0 < c < 1$. 对于观测器的动态误差 $e_k = x_k - \hat{x}_k$, 存在矩阵 $P > 0$ 满足

$$e_k^T P e_k - e_{k+1}^T P e_{k+1} \leq 0. \quad (26)$$

将式(24) 代入(26) 得

$$e_k^T P e_k - (A_0 - L_0 C) P (A_0 - L_0 C)^T e_k \leq 0, \quad (27)$$

令 $\alpha = 1, Q = P^{-1}$, 式(27) 可化为

$$\begin{bmatrix} Q & Q A_0 - W C \\ A_0^T Q - C^T W^T & Q \end{bmatrix} 0,$$

其中 $W = Q L_0$.

由不确定系统(1) 和状态观测器(23) 构造如下闭环系统:

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{A}_k \bar{x}_k. \quad (28)$$

其中

$$\bar{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ \hat{x}_k \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_k = \begin{bmatrix} A_k & B_k(D_j F + D_j H) \\ L_0 C & A_0 + B_0(D_j F + D_j H) - L_0 C \end{bmatrix}.$$

则闭环系统(28) 的稳定性可以通过如下定理进行检验:

定理 3 对于闭环系统(28), 如果存在矩阵 $Q > 0$ 满足线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} Q & Q^T \bar{A}_i^T \\ \bar{A}_i Q & Q \end{bmatrix} > 0, i = 1, 2, \dots, L, \quad (29)$$

则闭环系统是稳定的.

证明 对于闭环系统(28), 令二次函数 $V(\bar{x}_k) = \bar{x}_k^T P \bar{x}_k$, 如果闭环系统是稳定的, 必存在

$${}^T_k P_k - {}^T_{k+1} P_{k+1} > 0. \quad (30)$$

将式(28)代入(30),则有

$$P - \overline{A}_i^T P \overline{A}_i > 0, i = 1, 2, \dots, L. \quad (31)$$

由 Schur 补性质,有

$$\begin{bmatrix} Q & Q^T \overline{A}_i^T \\ \overline{A}_i Q & Q \end{bmatrix} > 0, i = 1, 2, \dots, L.$$

下面给出带有状态观测器的预测控制器设计步骤:

Step1: 给定初始的可行状态变量 x_0 ;

Step2: 给定无穷时域性能指标加权系数 Q_1 和 R , 根据定理 1 得到矩阵 U 和对称正定矩阵 G , 计算控制量 $u_k = \text{Sat}(UG^{-1}x_k)$;

Step3: 根据定理 2 求得观测器增益矩阵 $L_0 = Q^{-1}W$;

Step4: 根据定理 3, 验证闭环系统的稳定条件; 如果不满足, 则返回 Step2.

4 仿真研究

这里以一个角度定位系统为例来证明本文提出的带有观测器的预测控制器设计的有效性.

角度定位系统的离散模型为

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ 0 & 1 - 0.1 \mu \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \mu \end{bmatrix} u_k = A_k x_k + B_k u_k, \quad (32)$$

$$y_k = [1 \ 0] x_k = C x_k,$$

其中 $r = 0.787$. 这里参数 μ 是天线绕固定轴旋转的粘滞摩擦系数, 其变化在 $0.1 \sim 10$ 范围.

角度定位系统可视为一个凸多面体不确定系统, 满足 $\{A, B\} \in \text{Co}\{[A_1 \ B_1], [A_2 \ B_2]\}$, 其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ 0 & 0.99 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0787 \end{bmatrix}.$$

给定初始状态 $x_0 = [1 \ 0]^T$, 无穷时域性能指标为式(5), 选择加权系数 $Q_1 = \text{diag}\{1, 0\}$, $R = 0.0002$. 采用本文设计的带有状态观测器的预测控制器进行仿真, 将粘滞摩擦参数 μ 在 $0.1 \sim 10$ 之间随机变化, 得到状态变量 x_k , 输出变量 y_k 和控制量 u_k 的变化曲线如图 1 ~ 图 3 所示. 经过反复优化, 控制量满足执行器饱和约束 $|u_k| \leq 1$, 并且系统状态变量快速收敛. 仿真算例表明, 对于具有执行器饱和特性的不确定系统, 本文所设计的带有观测器的新型预测控制器是有效的.

5 结论

本文针对具有执行器饱和特性的凸多面体不确定系统提出了带有状态观测器的预测控制器设计方

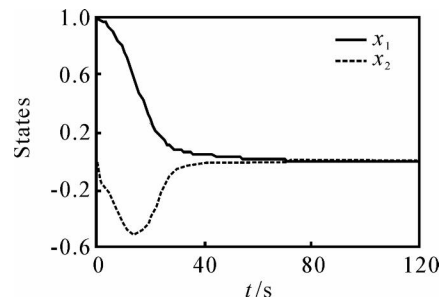


图1 状态变量响应曲线

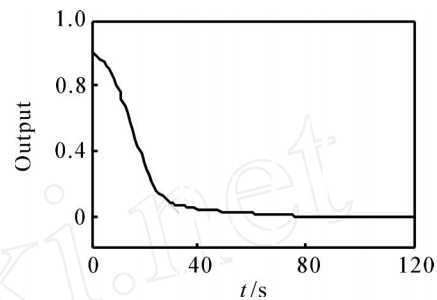


图2 输出变量响应曲线

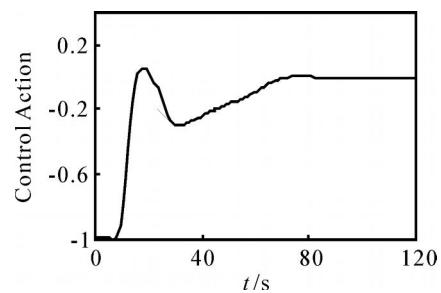


图3 控制量作用曲线

法. 该方法基于 Lyapunov 稳定性和饱和特性的反馈控制结构, 在滚动优化的每一步得到一个最优的控制律, 使性能指标最小, 从而将预测控制器设计问题转化为线性矩阵不等式组的可行解求解问题. 考虑了状态不完全已知的情况, 从而将观测器引入控制系统来观测系统的状态, 通过调整观测器参数使闭环系统渐近稳定. 仿真研究验证了所设计的带有状态观测器的新型预测控制器是有效的.

参考文献(References)

- [1] Richalet J, Rault A, Testud J L, et al. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes [J]. Automatica, 1978, 14(5): 413-428.
- [2] Garcia C E, Prett D M, Morari M. Model predictive control: Theory and practice - A survey [J]. Automatica, 1989, 25(3): 335-348.
- [3] Horisberger H P, Belanger P B. Regulators for linear, time invariant plants with uncertain parameters [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1976, 21(5): 705-708.

(下转第 225 页)

差收敛于任意设定的滑模面饱和层内. 仿真结果进一步说明了理论分析的有效性.

参考文献(References)

- [1] 王春行. 液压伺服控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
(Wang C X. Hydraulic servo control system [M]. Beijing: China Machine Press, 1987.)
- [2] 王雪松, 程玉虎, 易建强. 电-气位置伺服控制系统的研究进展[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 601-607.
(Wang X S, Cheng Y H, Yi J Q. Survey of the electro-pneumatic position servo control systems [J]. Control and Decision, 2007, 22(6): 601-607.)
- [3] Ioan U, Felicia U, Florica P. Backstepping design for controlling electrohydraulic servos[J]. J of the Franklin Institute, 2006, 343(1): 94-110.
- [4] 方一鸣, 聂颖, 王众. 电液伺服位置系统的变结构自适应鲁棒控制[J]. 计算机仿真, 2006, 23(11): 149-152.
(Fang Y M, Nie Y, Wang Z. Adaptive robust variable structure control of electro-hydraulic servo position system[J]. Computer Simulation, 2006, 23(11): 149-152.)
- [5] 陈浩锋, 戴一帆, 杨军宏. 非线性电液位置伺服系统的自学习滑模模糊控制[J]. 机床与液压, 2006, 34(9): 172-175.
(Chen H F, Dai Y F, Yang J H. Self-organizing sliding mode fuzzy control for electro-hydraulic position servo nonlinear systems [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006, 34(9): 172-175.)
- [6] 郭洪波, 李洪人. 基于 Backstepping 的阀控非对称缸电液伺服系统非线性控制[J]. 液压与气动, 2004, (10): 38-40.
(Guo H B, Li H R. Backstepping-based nonlinear control for asymmetric cylinder electro-hydraulic servo system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004, (10): 38-40.)
- [7] 黄进, 邵明贤, 段宝岩. 大射电望远镜舱索伺服系统的自适应滑模控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 647-651.
(Huang J, Shao M X, Duan B Y. Adaptive sliding mode control for cabin-cable servo system of large spherical radio telescope [J]. Control and Decision, 2007, 22(6): 647- 651.)
- [8] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学出版社, 1990.
(Gao W B. Theory foundation of variable structure control [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990.)
- [9] 管成, 朱善安. 基于 Backstepping 的电液伺服系统多级自适应滑模控制[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(6): 569-573.
(Guan C, Zhu S A. Backstepping-based multiple cascade adaptive sliding mode control of an electro-hydraulic servo system [J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2005, 26(6): 569-573.)
- [10] Pomet J B, Praly L. Adaptive nonlinear regulation: Estimation from Lyapunov equation [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(6): 729-740.
- [6] 郭洪波, 李洪人. 基于 Backstepping 的阀控非对称缸电

(上接第 220 页)

- [4] Kim J H. Discrete-time robust guaranteed cost filtering for convex bounded uncertain systems with time delay [J]. ICASE: The Institute of Control, Automation and Systems Engineers, 2002, 4(4): 324-329.
- [5] Kothare M, Balakrishnan V, Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities[J]. Automatica, 1996, 32(10): 1361-1379.
- [6] Francesco A Cuzzola, Jose C Geromel, Manfred Morari. An improved approach for constrained robust model predictive control[J]. Automatica, 2002, 38(7): 1183-1189.
- [7] Casavola A, Mosca E. Robust reference governors for constrained uncertain linear systems subject to input disturbances[C]. Proc of the 1996 IEEE Control and Decision Conference. Kobe, 1996: 3531-3536.
- [8] Casavola A, Giannelli M, Mosca E. Min-max predictive control strategies for input saturated polytopic uncertain systems [J]. Automatica, 2000, 36(1): 125-133.
- [9] Rawling J, Muske K. The stability of constrained receding horizon control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1993, 38(10): 1512-1516.
- [10] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V. Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [11] Tingshu Hu, Zongli Lin, Ben M Chen. An analysis and design method for linear systems subject to actuator saturation and disturbance [J]. Automatica, 2002, 38(2): 351-359.
- [12] 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.