

文章编号: 1001-0920(2006)04-0457-05

输入非线性系统的两步法预测控制的鲁棒稳定性

牛永肖, 丁宝苍, 孙鹤旭

(河北工业大学 电气与自动化学院, 天津 300130)

摘 要: 针对具有不确定性和输入饱和约束的 Hammerstein 模型, 采用两步法预测控制器, 首先不考虑约束、非线性性和不确定性, 得到一个期望的中间变量, 然后通过求解非线性代数方程组来处理非线性并通过解饱和来满足约束。采用 Lyapunov 方法得到了指数稳定条件, 并给出了吸引域的计算和调整方法。最后通过仿真实例验证了稳定性结果。

关键词: 输入非线性; 两步法预测控制; 稳定性; 吸引域

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Robust Stability of Two-step Predictive Control for Systems with Input Nonlinearities

N I U Yong-xiao, D I N G B ao-cang, S U N H e-xu

(School of Electricity and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China Correspondent: D I N G B ao-cang, E-mail: dingbc@jsemail.hebut.edu.cn)

Abstract: For Hammerstein model with uncertainty and input saturation constraint, a two-step model predictive control technique is adopted. The first step calculates a desired intermediate variable without considering the constraint, nonlinearity and uncertainty. The second step deals with nonlinearity by solving nonlinear algebraic equations and satisfies constraint by desaturation. Lyapunov method is applied to obtain the exponential stability conditions, with the approaches for calculating and tuning the domain of attraction given. The stability results are validated with a simulation example.

Key words: Input nonlinearity; Two-step model predictive control; Stability; Domain of attraction

1 引 言

文献[1, 2]研究了具有 Hammerstein 非线性和输入饱和约束的两步法预测控制(TSMPC)系统的稳定性, 其中假设线性子系统为标称系统。[3]讨论了线性子系统为不确定系统时的 TSMPC。在 TSMPC 中, 首先应用线性子模型计算一个期望的中间变量, 然后通过求解非线性代数方程组和解饱和来获得实际控制输入。因此, TSMPC 具有计算简单的优点。对于一个实际系统, 输入非线性的来源是多方面的, [1~ 3]不仅考虑了 NAEG 求解误差, 还考虑了输入静态不确定性。定义了闭环系统的滞留非线性项, 并计算了非线性项的界, 在设计参数调整中, 此

界也随之改变。[4]也研究了输入非线性控制系统的鲁棒稳定性, 但在参数调节前不确定性的界已经给出。[5]对 Hammerstein 模型采用了在优化中同时考虑非线性和约束的做法, 这些做法与 TSMPC 相比计算较大^[6]。

本文进一步研究了不确定系统的 TSMPC 稳定性, 其中与文献[3]不同的是采用了系统的多包描述, 因此能获得更好的稳定性结果, 给出更大的吸引域。

2 输入非线性系统的 TSMPC

考虑如下系统:

$$x(k+1) = A(k)x(k) + Bv(k),$$

收稿日期: 2005-01-26; 修回日期: 2005-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(60504013)

作者简介: 牛永肖(1981—), 女, 河北高邑人, 硕士生, 从事预测控制的研究; 丁宝苍(1972—), 男, 河北隆化人, 副教授, 博士, 从事预测控制、模糊控制等研究

$$v(k) = \Phi u(k). \tag{1}$$

其中: $x \in \mathbf{R}^n, v \in \mathbf{R}^m$ 和 $u \in \mathbf{R}^m$ 分别是可测状态、中间变量和输入; Φ 表示输入和中间变量之间的关系, 包含 Hammerstein 非线性 f 和输入饱和约束环节 $\text{sat}_i (i = 1, \dots, m)$, 即 $\Phi = f \text{sat}$, 且 $\Phi(0) = 0$ 假设

$$A(k) = A_0 + \Delta A \in Co\{A_1, A_2, \dots, A_L\}, \tag{2}$$

其中 A_0 代表标称系统, 即存在 L 个非负系数 ω 使得

$$\omega = 1, A(k) = \sum_{i=1}^L \omega A_i, \tag{3}$$

称式(2)和(3)为系统矩阵 $A(k)$ 的多包描述, 相应地, 系统(1)和(2)为多包描述系统

TSM PC 第 1 步考虑 $x(k+1) = A_0 x(k) + B v(k)$, 定义如下目标函数:

$$J = \sum_{j=0}^{N-1} [x(k+j|k)^T Q + v(k+j|k)^T R] + x(k+N|k)^T Q_N. \tag{4}$$

其中: 对任意 θ 和 Ψ , $\theta^T \Psi \theta = \theta^T Q \theta = Q^T \theta$ 和 $R > 0$ 是状态和中间变量加权矩阵; $Q_N = 0$ 为终端状态加权矩阵 采用下面的 Riccati 迭代:

$$P_j = Q + A_0^T P_{j+1} A_0 - A_0^T P_{j+1} B (R + B^T P_{j+1} B)^{-1} B^T P_{j+1} A_0, \tag{5}$$

$j < N, P_N = Q_N,$

可获得预测控制律为

$$v(k) = -(R + B^T P_{j+1} B)^{-1} B^T P_{j+1} A_0 x(k). \tag{6}$$

但式(6)中的 $v(k)$ 不一定能通过实际控制输入实现, 故将其表示为

$$v^L(k) = Kx(k) = -(R + B^T P_{j+1} B)^{-1} B^T P_{j+1} A_0 x(k). \tag{7}$$

TSM PC 第 2 步首先求解 $NAEG v^L(k) - f(u(k)) = 0$ 来获得 $u(k)$, 并通过解饱和运算 $u(k) = \text{sat}\{u(k)\}$ 得到 $u(k)$, 记为 $u(k) = g(v^L(k))$. 当实施 $u(k)$ 后, $v(k)$ 为

$$v(k) = f(\text{sat}\{u(k)\}) = f(\text{sat}\{g(v^L(k))\}) = (\Phi_g)(v^L(k)) = h(v^L(k)). \tag{8}$$

通过式(8)得到闭环系统为

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B v(k) = (A(k) + BK)x(k) + B [h(v^L(k)) - v^L(k)] \tag{9}$$

方程(9)可作为 TSM PC 稳定性分析的基础

3 TSM PC 的稳定性

引理 1^[4] 假设 X 和 Y 是适当维数的矩阵, s 和 w 是适当维数的向量, 则

$$2s^T X Y w = Y^T X X^T s + w^T Y^T Y w / Y, \tag{10}$$

$\forall Y > 0$

定理 1 对系统(1), 采用 TSM PC(8). 假设存在适当的 $0 < \mu < 1$, 使系统设计满足下列条件: 1)

$$Q > P_0 - \mu [1 - \alpha(1 + \mu)/(1 - \mu)] P_1,$$

$$\alpha = \max_i |A_i - A_0|,$$

2)

$$\forall x(0) \in \Omega \subset \mathbf{R}^n, \forall k = 0, \\ - (1 - \mu) \lambda v^L(k)^T v^L(k) - \\ \mu M h(v^L(k))^T h(v^L(k)) + [h(v^L(k)) - \\ v^L(k)]^T (\mu \lambda I + B^T P_1 B) [h(v^L(k)) - \\ v^L(k)] \leq 0, R = \lambda,$$

则闭环系统指数稳定, 吸引域为 Ω

证明 定义 $V(k) = x^T(k) P_{1k} x(k)$. 将式(5),

(9) 和引理 1 代入, 可以得到^[2,3,6]

$$V(k+1) - V(k) \\ x^T(k) [(1 + \mathcal{Y})(-Q + P_0) - P_1] x(k) + \\ (1 + 2/\mathcal{Y}) x^T(k) (A(k) - \\ A_0)^T P_1 (A(k) - A_0) x(k) - \\ \mathcal{Y} \lambda v^L(k)^T v^L(k) - M^T (v^L(k)) h(v^L(k)) + \\ [h(v^L(k)) - v^L(k)]^T [\lambda I + (1 + \\ \mathcal{Y}) B^T P_1 B] [h(v^L(k)) - v^L(k)] = \\ (1 + \mathcal{Y}) I_1(k),$$

$I_{1,l}(k) \leq 0$, 当且仅当 $I_{2,l}(k) \leq 0, \forall l = 1, 2, \dots, L$. 其中

$$I_{2,l}(k) = \\ x^T(k) [-Q + P_0 - P_1 / (1 + \mathcal{Y}) + \\ (2 + \mathcal{Y})(A_l - A_0)^T P_1 (A_l - \\ A_0) / (\mathcal{Y} + \mathcal{Y}^2)] x(k) - \\ \mathcal{Y} / (1 + \mathcal{Y}) \lambda (v^L(k))^T v^L(k) - \\ M^T (v^L(k)) h(v^L(k)) / (1 + \mathcal{Y}) + \\ [h(v^L(k)) - v^L(k)]^T (\lambda / (1 + \mathcal{Y}) + \\ B^T P_1 B) [h(v^L(k)) - v^L(k)]$$

定义 $\mu = 1/(1 + \mathcal{Y})$. 如果条件(1)和(2)满足, 则 $V(k+1) - V(k) < 0, \forall x(k) \in \Omega$, 即 $V(k)$ 是一个证明指数稳定的 Lyapunov 函数

定理 1 具有两步法的特点, 其中条件(1)是对线性控制律的要求, 条件(2)是对 h 的要求 如果条件(1)满足, 则可用条件(2)得到更加合理的结论 假设^[2]

$$h(s) = b_1 s, \\ h(s) = s |b - 1| s, \\ \forall s \in \Delta \tag{11}$$

其中: $b > 0$ 和 $b_1 > 0$ 是标量, v 是向量 v 的 2-范数 当 Hammerstein 非线性解耦时, 可假设^[2,7]

$$b_{i,1} s_i^2 = h_i(s_i) s_i = b_i 2s_i^2, \\ \forall |s_i| \in \Delta, i = 1, 2, \dots, m, \tag{12}$$



其中 $b_{i,2} \quad b_{i,1} > 0$ 是标量 令

$$\begin{aligned}
b_1 &= \min\{b_{1,1}, \dots, b_{m,1}\}, \\
|b - 1| &= \max\{|b_{1,1} - 1|, \dots, |b_{m,1} - 1|, \\
&\quad |b_{1,2} - 1|, \dots, |b_{m,2} - 1|\}. \quad (13)
\end{aligned}$$

则式(11)可由式(12)推出 对于计算 $b_{i,1}, b_{i,2}, b_1$ 和 b 的方法可参见文献[1, 2]

推论 1 对于系统(1), 采用 TSM PC, 其中 h 满足式(11). 假设: 1)

$$\forall x(0) \in \Omega \subset \mathbf{R}^n, \forall k \geq 0, \quad |v^L(k)| \leq \Delta;$$

2) 存在适当的 $0 < \mu < 1$ 使系统的设计满足

$$\begin{aligned}
Q &> P_0 - \mu[1 - \alpha(1 + \mu)/(1 - \mu)]P_1, \\
\alpha &= \max_i |A_i - A_0|^2, \\
&- \lambda[1 - \mu + \mu b_i^2 - \mu(b - 1)^2] + \\
&(b - 1)^2 \alpha_{\max}(B^T P_1 B) < 0, \\
R &= \lambda I,
\end{aligned}$$

则闭环系统指数稳定, 吸引域为 Ω

证明 由式(11)可得

$$\begin{aligned}
&- (1 - \mu)\lambda s^T s - \mu\lambda h^T(s)h(s) + \\
&(h(s) - s)^T(\mu\lambda I + B^T P_1 B)(h(s) - s) \\
&- (1 - \mu)\lambda s^T s - \mu\lambda b_i^2 s^T s + \\
&(b - 1)^2 \alpha_{\max}(\mu\lambda I + B^T P_1 B) s^T s = \\
&- \lambda[1 - \mu + \mu b_i^2 - \mu(b - 1)^2] s^T s + \\
&(b - 1)^2 \alpha_{\max}(B^T P_1 B) s^T s
\end{aligned}$$

因此, 由定理1的条件2)可以推出推论1的条件2), 结论成立

类似文献[1]的推导, 并结合推论1, 还可得到如下结论:

推论 2 对系统(1), 采用 TSM PC, 其中 h 满足式(12). 假设:

$$\begin{aligned}
1) \quad &\forall x(0) \in \Omega \subset \mathbf{R}^n, \forall k \geq 0, \\
&\quad |v_i^L(k)| \leq \Delta, i = 1, 2, \dots, m; \\
2) \quad &\text{存在适当的 } 0 < \mu < 1 \text{ 使系统的设计满足} \\
Q &> P_0 - \mu[1 - \alpha(1 + \mu)/(1 - \mu)]P_1, \\
\alpha &= \max_i |A_i - A_0|^2, \quad (14) \\
&- \lambda[1 + 2\mu(b_1 - 1)] + \\
&(b - 1)^2 \alpha_{\max}(B^T P_1 B) < 0, \\
R &= \lambda I, \quad (15)
\end{aligned}$$

则闭环系统指数稳定, 吸引域为 Ω

4 吸引域的计算和调整

通常对非线性 h 可以采用线性差分包含技术, 即

$$h(s) = \sum_{l_h=1}^{L_h} \xi_{l_h} H_{l_h} s, \quad \xi_{l_h} = 1, \xi_{l_h} = 0, \quad (16)$$

其中 $\xi_{l_h}, l_h = 1, 2, \dots, L_h$ 为组合系数 故

$$\begin{aligned}
x(k+1) &= A(k)x(k) + Bv(k) = \\
&A(k)x(k) + B h(v^L(k)) = \\
&\left(\sum_{l=1}^L \omega A_l + B \sum_{l_h=1}^{L_h} \xi_{l_h} H_{l_h} K \right) x(k). \quad (17)
\end{aligned}$$

显然式(17)可表示为

$$x(k+1) = A_c(k)x(k). \quad (18)$$

其中 $A_c(k) = \sum_{l=1}^{L_c} \zeta_l A_{c,l}$, 可选择 L_c 使得式(18)能够包含所有可能 (A_l, B, H_{l_h}) 的组合

以推论2为例(推论3类似), 将最大输出可行集理论^[8]应用于式(18). 假设条件(2)满足, 则满足条件(1)的吸引域可通过下面的算法得到:

算法 1

Step 1: 令

$$\begin{aligned}
S_0 &= \\
&\{\theta \in \mathbf{R}^n \mid K_i \theta \leq \Delta, \\
&\quad K_i \theta \geq -\Delta, i = 1, 2, \dots, m\} = \\
&\{\theta \in \mathbf{R}^n \mid F^{(0)} \theta \leq g^{(0)}\}. \quad (19)
\end{aligned}$$

其中: K_i 是 K 的第 i 行, $i = 1, 2, \dots, m$; $F^{(0)} = \begin{bmatrix} K \\ -K \end{bmatrix}$, $g^{(0)} = \begin{bmatrix} \Delta \\ -\Delta \end{bmatrix}$; Δ 是一个 m 维的列向量, 其所有元素是 Δ 令 $j = 1$.

Step 2: 令

$$\begin{aligned}
N_j &= \\
&\{\theta \in \mathbf{R}^n \mid F^{(j-1)} A_{c,l_c} \theta \leq g^{(j-1)}, \\
&\quad l_c = 1, 2, \dots, L_c\} = \\
&\{\theta \in \mathbf{R}^n \mid F_N^{(j)} \theta \leq g_N^{(j)}\}, \quad (20)
\end{aligned}$$

$$S_j = S_{j-1} \cap N_j = \{\theta \in \mathbf{R}^n \mid F^{(j)} \theta \leq g^{(j)}\}. \quad (21)$$

Step 3: 如果 $S_j = S_{j-1}$, 则 $\Omega^0 = S_{j-1}$ 是 TSM PC 的吸引域 否则, 令 $j = j + 1$ 并转至 Step 2

通常, 算法1中获得的 Ω^0 与控制器参数 λ, N, Q 和 Q_N 的关系很难明确化, 因此下面给出易操作的椭圆型吸引域(称一个椭球为 TSM PC 闭环系统的吸引域, 是指当初始状态位于该椭球内部时, 未来的状态将逐渐收敛到状态空间的原点):

推论 3 考虑系统(1)和 TSM PC (8), h 满足式(11). 如果推论1中的条件满足, 那么闭环系统(9)的吸引域不会小于 $S_c = \{x \in \mathbf{R}^n \mid x^T P_1 x \leq c\}$, 其中 $c = \Delta^2 / (N + B^T P_1 B)^{-1} B^T P_1 A_0 P_1^{-1/2}$.

推论3的证明参考文献[3] 给定 $\Omega \subset \mathbf{R}^n$, 可用下面的算法来确定一个包含 Ω 的椭圆型吸引域, 或确定一组椭圆型吸引域, 使得它们的并集包含 Ω

算法 2

Step 1: 选适当的 Δ , 令 $S = \{0\}, i = 1$.

Step 2: 选择 $\{\lambda, Q_N, Q, N\}$.

Step3: 检查是否满足式(14). 若否, 调整 $\{Q_N, Q, N\}$ 满足它

Step4: 检查是否满足式(15). 若否, 调整 λ 满足它 重复 Step3, 直到式(14) 和(15) 全部满足为止

Step5: 通过推论3 确定 c , 则实际系统的吸引域将包括水平集 $S_c = \{x | x^T P_1 x \leq c\}$.

Step6: 记 $\{\lambda, Q_N, Q, N\}^i = \{\lambda, Q_N, Q, N\}, S^i = S_c, S = S \quad S^i$.

Step7: 检查是否 $S \supseteq \Omega$ 如果是, 则转到 Step6; 否则令 $i = i + 1$, 选择一组新的 $\{\lambda, Q_N, Q, N\}$, 如果 $i + 1 > M_0$ (其中 M_0 是一个提前设定的比较大的数值), 转到 Step8, 否则转到 Step3.

Step8: 记 $M = i$, 停止

在算法2 中可能出现3 种情形:

1) 找到一个 S_c 且满足 $S_c \supseteq \Omega$, 这时只需采用这个 S_c 对应的控制器;

2) 找到一组 $S_{c_i}^i (i = 1, 2, \dots, M, 1 < M < M_0)$ 且满足 $\bigcup_{i=1}^M S_{c_i}^i \supseteq \Omega$, 这时可采用文献[3] 给出的控制器切换方法;

3) 对所有的 $M < M_0$, 均不能找到 $S_{c_i}^i$ 满足 $\bigcup_{i=1}^M S_{c_i}^i \supseteq \Omega$ 这时可采用其他控制策略, 如可直接采用基于非线性优化的预测控制 但注意当所期望的 Ω 超出系统(1) ~ (3) 的最大可镇定域(可以镇定的、最大可能的初始状态的范围) 时, 采用任何控制器都不能达到期望要求

5 实 例

考虑

$$A(k) = Co \left\{ \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 \\ 1 & 0.9 & 0 \\ 1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.1 & 0 \\ 1 & 1.1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1.1 & 0 \\ 1 & 1.1 \end{bmatrix} \right\},$$

$$A_0 = [10; 11], B = [1, 0]$$

假设

$$v(k) = f(u(k)) = u(k) + u(k) \sin(\pi u(k))/3,$$

输入约束为 $|u(k)| \leq 1$. 求解 $NAEGv^L(k) - f(u(k)) = 0$ 来获得 $u(k)$, 为简单起见, 采用 $u(k) = v^L(k)$ 作为方程的解 易知, $b_1 = 2/3, b_2 = 4/3, \Delta f(1)/b_1 = 1.5$, 取 $\alpha = 0.01$, 目的是设计 TSM PC, 使得其具有吸引域

$$\Omega = Co \{ [-1.5, 3.5], [-2, 2.5], [1.5, -3.5], [2, -2.5] \}.$$

首先, 选择两组控制器参数, 使得对应的椭圆型吸引域的并集包含 Ω 两组参数、相应的椭圆型吸

引域及 μ 的选择如下:

$$\{\lambda, Q_N, Q, N\}^1 = \left\{ 0.2, \begin{bmatrix} 1.252 & 8 & 0 & 573 & 9 \\ 0 & 573 & 9 & 0 & 373 & 1 \\ 0 & 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, 1 \right\},$$

$$\{\lambda, Q_N, Q, N\}^2 = \left\{ 0.1, \begin{bmatrix} 0.275 & 8 & 0 & 127 & 2 \\ 0 & 127 & 2 & 0 & 101 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, 1 \right\},$$

$$S_{c_i}^i = \begin{cases} S_{0.4426}^1, & i = 1; \\ S_{0.4743}^2, & i = 2 \end{cases}$$

$$\mu^1 = 0.402, \mu^2 = 0.79$$

排列上面的域和参数组如下:

$$S^{(1)} = S_{c_1}^1, S^{(2)} = S_{c_2}^2,$$

$$\{\lambda, Q_N, Q, N\}^{(1)} = \{\lambda, Q_N, Q, N\}^1,$$

$$\{\lambda, Q_N, Q, N\}^{(2)} = \{\lambda, Q_N, Q, N\}^2.$$

图1 给出了两个域 $S^{(1)}$ 和 $S^{(2)}$. 选择 Ω 的顶点作为4 组初始状态, 并假设 $A(k)$ 在定义的多包中随机选取 仿真结果见图1, 证明了定理1、推论1、推论3 和控制器切换算法的有效性 然后, 计算 $\{\lambda, Q_N, Q, N\}^{(1)}$ 对应的多面体型吸引域, 得到的 Ω^0 如图2 所示 由于 $\Omega^0 \supseteq \Omega$, 仅采用控制器参数 $\{\lambda, Q_N, Q, N\}^{(1)}$, 而不采用控制器切换算法, 对应4 组初始状态的闭环系统都是稳定的

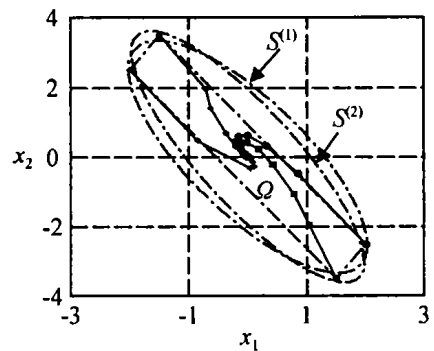


图1 椭圆型吸引域及控制器切换算法的闭环系统状态轨迹

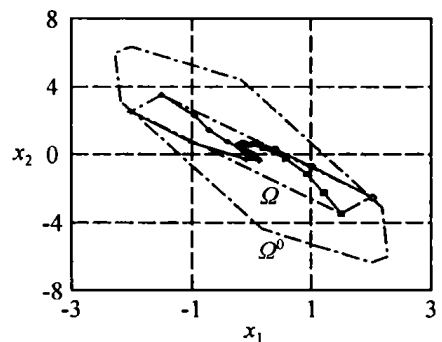


图2 多面体型吸引域及其对应的闭环系统状态轨迹

6 结 论

研究了基于 Hammerstein 模型, 同时考虑不确定性和输入饱和约束的两步法预测控制的稳定性, 得到了稳定性结果, 并给出了吸引域的计算和调整方法. 与文献[5]的方法相比, 两步法控制器更简单和易于实现. 进一步的研究方向为如何将 TSMPC 和文献[5]中的方法相结合, 这样不仅具有稳定性保证, 而且可以得到较大的吸引域.

参考文献(References)

- [1] Ding B C, Li S Y, Xi Y G. Stability Analysis of Generalized Predictive Control with Input Nonlinearity Based on Popov's Theorem [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(4): 582-588.
- [2] Ding B C, Xi Y G, Li S Y. Stability Analysis on Predictive Control of Discrete-time Systems with Input Nonlinearity [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(6): 827-834.
- [3] Ding B C, Li S Y, Xi Y G. Robust Stability Analysis of Predictive Controller for Systems with Input Nonlinearity [A]. *Proc ACC [C]*. Denver, 2003: 3626-3631.
- [4] Kim J H, Bien Z. Robust Stability of Uncertain Linear Systems with Saturating Actuators [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(1): 202-207.
- [5] Bloemen H H J, Van de Boom T J J, Verbruggen H B. Model-based Predictive Control for Hammerstein Systems [A]. *Proc IEEE-CDC [C]*. Sydney, 2000: 4963-4968.
- [6] Ding B C, Xi Y G, Li S Y. On the Stability of Output Feedback Predictive Control for Systems with Input Nonlinearity [J]. *Asian J of Control*, 2004, 6(3): 388-397.
- [7] Lin Z, Saberi A, Stoorvogel A A. Semiglobal Stabilization of Linear Discrete-time Systems Subject to Input Saturation via Linear Feedback - An ARE-based Approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41: 1203-1207.
- [8] Gilbert E G, Tan K T. Linear Systems with State and Control Constraints: The Theory and Application of Maximal Output Admissible Sets [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, 36(9): 1008-1020.

(上接第 456 页)

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks [A]. *IEEE Proc of the Hawaii Int Conf System Sciences [C]*. Washington: IEEE Computer Society, 2000: 175-187.
- [3] Manjeshwar A, Agrawal D. Teen: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks [A]. *Proc of the 1st Int Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing [C]*. New York: ACM Press, 2001: 304-309.
- [4] Lindsey S, Raghavendra C. PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems [A]. *Proc of the IEEE Aerospace Conf [C]*. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1-6.
- [5] Younis O, Fahmy S. HEED: A Hybrid, Energy-efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.
- [6] Eberhart R C, Shi Y. Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization [A]. *Proc Congress Evolutionary Computation [C]*. Piscataway: IEEE Press, 2000: 84-88.
- [7] Eberhart R C, Shi Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources [A]. *Proc Congress on Evolutionary Computation [C]*. Piscataway: IEEE Press, 2001: 81-86.
- [8] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization [A]. *Proc of the IEEE Int Conf on Neural Networks [C]*. Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [9] Salman A, Ahmad I. Particle Swarm Optimization for Task Assignment Problem [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2002, 26(8): 363-371.