

文章编号: 1001-0920(2007)01-0100-05

基于动态非线性逼近的非线性系统预测控制

沈永良, 胡致强, 赵建华

(黑龙江大学 电子工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 对于一类常见多重时滞非线性离散系统, 提出基于动态非线性逼近的增量型最小化递推预测模型、广义预测控制律、噪声估计器以及参数自适应递推预报算法, 实现了对存在较大滞后的时滞非线性系统的广义预测控制. 仿真结果表明了该算法的正确性和有效性.

关键词: 非线性系统; 广义预测控制; 参数自适应递推预报

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Predictive control for nonlinear systems based on dynamic approximate nonlinearization

SHEN Yong-liang, HU Zhi-qiang, ZHAO Jian-hua

(School of Electron Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China. Correspondent: HU Zhi-qiang, E-mail: huzhiqiang68@126.com)

Abstract: The generalized predictive control algorithm, the parameter adaptive recursive predicting and the noise estimator are presented based on dynamic approximate nonlinearization increment minimized recursive predicting model for a class of nonlinear discrete-time systems with multiple time delays. Generalized predictive control is employed for nonlinear systems with heavy multiple time delays. The simulation results show the correctness and effectiveness of the proposed approach.

Key words: Nonlinear systems; Generalized predictive control; Parameter adaptive recursive predicting

1 引言

20 世纪 90 年代以来, 非线性系统预测控制的研究引起了人们的重视. 非线性离散系统的预测控制, 对解决模型未知、时变、强非线性系统具有很强的适用性. 为此, 人们对各种典型模型的广义预测控制问题进行了许多研究^[1-4].

本文在文献[5-10]的基础上, 基于 NARMAX 的非线性系统动态非线性逼近的增量型最小化模型, 解决了预测控制律的长时段优化计算、控制器参数递推预报和系统的噪声估计问题. 该系统具有较强的鲁棒稳定性和稳态无偏性, 实现了非线性系统的广义预测控制. 该算法不用解 Diophantine 方程, 在线计算量小, 实时性好, 具有很强的抑制噪声干扰的能力.

2 系统模型及增量型最小化递推预测模型

考虑下述 SISO 非线性离散系统模型:

$$y(k+d) = f(y(k+d-1), y(k+d-2), \dots, y(k+d-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u), e(k), e(k-1), \dots, e(k-n_e)). \quad (1)$$

其中: $\{y(k)\}$ 和 $\{u(k)\}$ 分别为系统输出、输入; $\{e(k)\}$ 为零均值、方差为 σ^2 的高斯白噪声; n_y, n_u, n_e 分别为它们的阶; d 为时滞, $d \geq 1$; $f(\dots)$ 为未知非线性函数.

式(1)称为 NARMAX 模型. Hammerstein 模型、双线性模型、输出仿射(Output affine)模型及其他一些非线性模型可认为是系统(1)的特殊情况.

假设 1 系统(1)是可控制的.

假设 2 $\frac{\partial^h f(\dots, s(i), \dots)}{\partial s(i)^h}$ 存在. 其中 $s = u, e; h = 1, 2; i = 0, 1, \dots$

假设 3 系统(1)满足

收稿日期: 2005-10-27; 修回日期: 2006-03-09.

基金项目: 黑龙江省教育厅科技研究项目(10543061); 黑龙江大学重点实验室项目.

作者简介: 沈永良(1964—), 男, 黑龙江双鸭山人, 副教授, 从事非线性自适应及预测控制、智能检测与仪表等研究;

胡致强(1961—), 男, 南昌人, 教授, 从事非线性自适应及预测控制、智能控制等研究.

$$\begin{aligned} & / y(k+d) / \\ & \sum_{i=0}^{n_u-2} L_{hui} / e^h(k-i) / + \\ & \sum_{i=0}^{n_u-2} L_{hei} / u^h(k-i) / , \\ & \forall k \in [0, \infty), u^h(k-i) \in [b, c]. \end{aligned} \quad (2)$$

这里 $y(k+d) = y(k+d) - y(k+d-1)$; $s^h(k-i) = [s(k-i) - s(k-(i+1))]^h$; h, s 的含义同上; $L_{1ui}, L_{2ui}, L_{1ei}$ 和 L_{2ei} 均为常数; b 和 c 均为实数.

上述假设条件对一些实际非线性系统并非太苛刻. 假设 3 说明, $\partial^h f(\cdot, s(i), \cdot) / \partial s(i)^h$ 有界, 控制输入及系统输出有界, 即系统为 BIBO 稳定.

定理 1 若系统(1) 满足假设 1 ~ 假设 3, 则有基于动态非线性逼近的增量型最小化模型

$$\begin{aligned} y(k+d) = & \sum_{i=0}^{n_u-2} \Phi_{hui}(k-i) u^h(k-i) + \\ & \sum_{i=0}^{n_e-2} \Phi_{hei}(k-i) e^h(k-i) + e(k+d), \end{aligned} \quad (3)$$

且 $\Phi_{hsi}(k-i) = L_{hsi}$. 其中: $h = 1, 2; s = u$ 时, $i = 0, \dots, n_u$; $s = e$ 时, $i = 0, \dots, n_e$.

证明 对于系统(1), 用 Taylor 展开式在 $y(k+d-1)$ 处展开, 得

$$\begin{aligned} & y(k+d) = \\ & y(k+d-1) + \\ & \sum_{j=1}^{n_y} \frac{\partial f(\dots)}{\partial y(k+d-j)} [y(k+d-j) - \\ & y(k+d-(j+1))] + \\ & \sum_{i=0}^{n_u-2} \frac{1}{h!} \frac{\partial^h f(\dots)}{\partial u(k-i)^h} [u(k-i) - \\ & u(k-(i+1))]^h + \\ & \sum_{i=0}^{n_e-2} \frac{1}{h!} \frac{\partial^h f(\dots)}{\partial e(k-i)^h} [e(k-i) - \\ & e(k-(i+1))]^h + o(T), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $o(T)$ 代表 Taylor 展开式中的所有余项. 记

$$\begin{aligned} \Phi_{hsi}(k+d-i) &= \frac{1}{h!} \frac{\partial^h f(\dots)}{\partial s(k+d-i)^h}; \\ s^h(k+d-i) &= \\ & [s(k+d-i) - s(k+d-(i+1))]^h. \end{aligned}$$

其中: $s = y$ 时, $h = 1, i = 1, \dots, n_y$; $s = u$ 时, $h = 1, 2, d = 0, i = 0, \dots, n_u$; $s = e$ 时, $h = 1, 2, d = 0, i = 0, \dots, n_e$; $h = 1$ 时省略部分标注. 将 $o(T)$ 项记为 $e_h(k+d)$, 有

$$\begin{aligned} y(k+d) = & \sum_{i=1}^{n_y} \Phi_{yi}(k+d-i) y(k+d-i) + \\ & e_h(k+d) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{n_u-2} \Phi_{hui}(k-i) u^h(k-i) + \\ & \sum_{i=0}^{n_e-2} \Phi_{hei}(k-i) e^h(k-i) + e_h(k+d). \end{aligned} \quad (5)$$

令

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) y(k+d) = & \sum_{i=1}^{n_y} \Phi_{yi}(k+d-i) y(k+d-i), \\ B_h(q^{-1}) u^h(k) = & \sum_{i=0}^{n_u} \Phi_{hui}(k-i) u^h(k-i), \\ C_h(q^{-1}) e^h(k) = & \sum_{i=0}^{n_e} \Phi_{hei}(k-i) e^h(k-i). \end{aligned}$$

其中: q^{-1} 为后移算符, $A(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_y} \bar{\Phi}_{yi} q^{-i}$, $B_h(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_u} \bar{\Phi}_{hui} q^{-i}$, $C_h(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_e} \bar{\Phi}_{hei} q^{-i}$ 且 $\bar{\Phi}_{y0} = 1, \bar{\Phi}_{hsi}$ 为 $\Phi_{hsi}(\cdot)$ 的数值. 假设 $A(q^{-1})$ 是稳定的, 则式(5) 可表示为

$$\begin{aligned} y(k+d) = & \sum_{h=1}^2 \frac{B_h(q^{-1})}{A(q^{-1})} u^h(k) + \\ & \sum_{h=1}^2 \frac{C_h(q^{-1})}{A(q^{-1})} e^h(k) + \frac{1}{A(q^{-1})} e_h(k+d). \end{aligned}$$

可得

$$\begin{aligned} \frac{B_h(q^{-1})}{A(q^{-1})} &= \Phi_{hu}(q^{-1}) = \\ & \bar{\Phi}_{hu0} + \bar{\Phi}_{hu1} q^{-1} + \dots + \bar{\Phi}_{hun\phi} q^{-un\phi}, \\ \frac{C_h(q^{-1})}{A(q^{-1})} &= \Phi_{he}(q^{-1}) = \\ & \bar{\Phi}_{he0} + \bar{\Phi}_{he1} q^{-1} + \dots + \bar{\Phi}_{hen\phi} q^{-en\phi}. \end{aligned}$$

为减少模型参数数量, 令

$$\begin{aligned} un\phi &= n_u, en\phi = n_e, \\ \frac{1}{A(q^{-1})} e_h(k+d) &= e(k+d), \end{aligned}$$

即得式(3).

由式(2) 与(3) 的比较可知

$$\begin{aligned} & / \Phi_{hui}(k-i) / = L_{hui}, i = 0, \dots, n_u; \\ & / \Phi_{hei}(k-i) / = L_{hei}, i = 0, \dots, n_e. \end{aligned}$$

即假设 3 限定了 $\partial^h f(\cdot, s(i), \cdot) / \partial s(i)^h$ 有界.

由式(3) 可得系统的增量型最小化递推预测(器) 模型

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+j/k) = & \sum_{i=0}^{n_e-2} \Phi_{hei}(k+j-d-i) e^h(k+j-d-i) + \end{aligned}$$

$$\sum_{i=0}^{n_u-2} \sum_{h=1}^{n_{uv}} \phi_{hi}(k+j-d-i) u^h(k+j-d-i). \quad (6)$$

式中: $\hat{y}(k+j|k)$ 是在 k 时刻对 $y(k+j)$ 作出的预测值, $j=1, k+j-i \leq k$ 时, $\hat{y}(k+j-i) = y(k+j-i)$.

3 非线性系统广义预测控制算法

非线性系统广义预测控制问题是在系统(1)模型结构及参数 n_y, n_u 未知且存在噪声干扰的情况下, 已知 $\{y(k+n_p), \dots, y(k+1), y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots\}$, 且满足极小化广义性能指标(7), 求控制 $u(k)$, 即

$$J_1(u(k)) = E \left[\sum_{j=1}^{n_p} (y(k+j) - y^*(k+j))^2 + \sum_{i=0}^{n_{uv}} u(k-i)^2 \right]. \quad (7)$$

其中: $y^*(k+j)$ 为系统在 $k+j$ 时刻的期望输出值; n_p 为预测长度, n_{uv} 为控制时域长度^[6], 满足 $n_{uv} \leq n_u, d \leq n_p$; 为权重系数.

考虑式(3)和(6), 有

$$y(k+j) = \hat{y}(k+j|k) + e(k+j). \quad (8)$$

当式(3)的参数和噪声统计已知时, 式(8)右边的两项是不相关的, 从而易知求 $u(t)$ 极小化 J_1 等价于求 $u(t)$ 极小化 J_2 .

$$J_2(u(k)) = E \left[\sum_{j=1}^{n_p} (\hat{y}(k+j|k) - y^*(k+j))^2 + \sum_{i=0}^{n_{uv}} u(k-i)^2 \right], \quad (9)$$

其中 $E[(e(k+j))^2]$ 为常数.

对于式(9), 置 $\partial J_2(u(k))/\partial u(k) = 0$, 由 Newton-Raphson 方法得

$$u(k) = u(k-1) + \lambda \left[\sum_{i=0}^{n_{pm}-d} (n_{pm}+1-d-i) (\phi_{ui}(k-i) + 2\phi_{2ui}(k-i) u(k-1)) \right]^{-1} \left[\sum_{i=0}^{n_{pm}-d} 2(n_{pm}+1-d-i) \phi_{ui}(k-i) (\phi_{ui}(k-i) + 2\phi_{2ui}(k-i) u(k-1)) \right]^{-1} \left[\sum_{i=0}^{n_{pm}-d} (n_{pm}+1-d-i) \phi_{ui}(k-i) + 2\phi_{2ui}(k-i) u(k-1) \right].$$

式中

$$g(n_p) = \sum_{i=1}^{n_{uv}} u(k-i). \quad (10)$$

$$g(n_p) = \sum_{j=1}^{n_p} y^*(k+j) - n_p y(k) - \sum_{j=0}^{n_p} \left[(n_p+1-j) \sum_{i=0}^{n_e-2} \sum_{h=1}^{n_{uv}} \phi_{hi}(k+j-d-i) e^h(k+j-d-i) + \sum_{i=0}^{n_u-2} \sum_{h=1}^{n_{uv}} \phi_{hi}(k+j-d-i) u^h(k+j-d-i) \right]. \quad (11)$$

其中: $d \leq n_p < n_u + d$ 时, $n_{pm} = n_p$; $n_p \leq n_u + d$ 时, $n_{pm} = n_u + d$. 由系统可实现条件, $k+j-d-i > k$ 或 $j > n_s + d$ 时, $s(k+j-d-i) = 0, \phi_{hi}(k+j-d-i) = 0, s = u, e; y(k)$ 为系统的实际输出值; k 为控制律中的步长系数, 使式(10) 变得更为通用. 式(10) 即为非线性系统的广义预测控制算法.

算法的稳定条件为^[8]

$$\left[\sum_{i=0}^{n_{pm}-d} (n_{pm}+1-d-i) (\phi_{ui}(k-i) + 2\phi_{2ui}(k-i) u(k-1)) \right]^2 - \sum_{i=0}^{n_{pm}-d} 2(n_{pm}+1-d-i) \phi_{ui}(k-i) \phi_{2ui}(k-i) \left[g(n_p) \right] > 0. \quad (12)$$

因为噪声 $e(k+1)$ 是不可观测的, 因此式(11) 中的 $e^h(k+j-d-i) (i=0, \dots, n_e)$ 的值是未知的. 考虑式(3), 并由式(6), 令 $j=1, y(k+1|k) = y^*(k+1)$, 其估值 $\hat{e}(k+j-d-i)$ 的噪声估计器为

$$\hat{e}(k+1) = y^*(k+1) - y(k) - \sum_{i=0}^{n_u-2} \sum_{h=1}^{n_{uv}} \phi_{hi}(k+1-d-i) u^h(k+1-d-i) - \sum_{i=0}^{n_e-2} \sum_{h=1}^{n_{uv}} \phi_{hi}(k+1-d-i) e^h(k+1-d-i). \quad (13)$$

可见, 估值 $\hat{e}(\cdot)$ 由系统期望输出值、系统的实际输出值和增量型最小化模型估计值共同产生, 再次引入了反馈控制.

4 控制算法参数 $\phi_{hi}(k-i)$ 自适应递推预报算法

由于 $\partial f(\cdot, s(i), \cdot) / \partial s(i)^h$ 是未知时变的, 即预测控制算法(10)和(11)中 $\phi_{hi}(k-i)$ 是未知时变

的,应基于{y(k), y(k - 1), ..., u(k - 1), u(k - 2), ..., ϕ_{hsi}(k - (i + 1))} 在线辨识和预报 ϕ_{hsi}(k - i).

令

$$J_3(\phi_{hsi}(k - i)) = (\hat{y}(k + d) - \hat{y}(k + d - 1) - \sum_{j=0}^{n_u-2} \phi_{huj}(k - j) u^h(k - j) - \sum_{j=0}^{n_e-2} \phi_{hej}(k - j) \hat{e}^h(k - j))^2 + \mu_{hski} (\phi_{hsi}(k - i))^2. \tag{14}$$

其中:s = u时,i = 0, ..., n_u;s = e时,i = 0, ..., n_e; μ_{hski} 为权重系数.置 ∂J₃(ϕ_{hsi}(k - i))/∂ϕ_{hsi}(k - i) = 0, h = 1, 2, 由式(14) 得

$$\phi_{hsi}(k - i) = \phi_{hsi}(k - (i + 1)) + \frac{\mu_{hski}}{\mu_{hski} + (s(k - (i + 1)))^{2h}} \{ s^h(k - (i + 1)) [\hat{y}(k + d - 1) - \sum_{j=0}^{n_e-2} \phi_{mej}(k - (j + 1)) \hat{e}^m(k - (j + 1)) - \sum_{j=0}^{n_u-2} \phi_{muj}(k - (j + 1)) u^m(k - (j + 1))] \}. \tag{15}$$

其中: h_{ski} 为步长系数; h, s, i 的含义同上.

由式(3) 可得 ŷ(k + d - 1) 的预报器为

$$\hat{y}(k + d - 1) = y(k) + \sum_{i=0}^{n_e-2} [\phi_{mei}(k - i - 1) \hat{e}^m(k - i - 1) - \phi_{mei}(k - d - i) \hat{e}^m(k - d - i)] + \sum_{i=0}^{n_u-2} [\phi_{mui}(k - i - 1) u^m(k - i - 1) - \phi_{mui}(k - d - i) u^m(k - d - i)], \tag{16}$$

故 ŷ(k + d - 1) 由系统的实际输出值和逼近模型估计值产生. 将式(16) 代入(15), 得

$$\phi_{hsi}(k - i) = \phi_{hsi}(k - (i + 1)) + \frac{\mu_{hski}}{\mu_{hski} + (s(k - (i + 1)))^{2h}} \{ s^h(k - (i + 1)) [y(k) - \sum_{j=0}^{n_e-2} \phi_{mej}(k - d - j) \hat{e}^m(k - d - j) - \sum_{j=0}^{n_u-2} \phi_{muj}(k - d - j) u^m(k - d - j)] \}. \tag{17}$$

式(17) 为参数 ϕ_{hsi}(k - i) 的自适应递推预报算法. 该算法的稳定条件为 μ_{hski} + (s(k - (i + 1)))^{2h} > 0. 显然此条件是满足的. 该算法稳定条件证明参见文献[8].

用预测控制算法和参数自适应递推预报算法, 即用式(10), (13) 和(17) 可实现多重时滞非线性系统的预测控制. 其系统结构如图 1 所示.

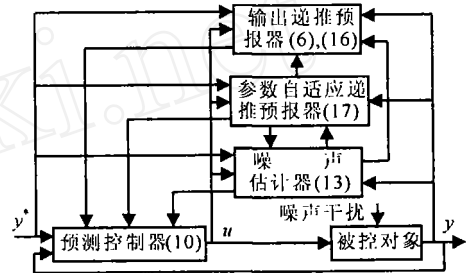


图 1 非线性系统的广义预测控制系统结构

本算法特点如下:

1) 实现了基于动态非线性逼近的非线性系统广义预测控制, 发展了基于动态线性逼近的非线性系统广义预测控制^[9] 的结果, 可更有效地解决存在较大滞后的时滞非线性系统的控制问题.

2) 由于控制器采用 u 增量形式(模型也采用 y 增量形式), 系统广义开环脉冲传函至少含有一个积分环节, 无论模型与对象是否匹配, 只要闭环系统稳定, 系统对阶跃输入 {y*(k)} 和常值扰动 {e(k)} 均不存在静差.

3) 该算法不需要受控系统的结构信息、数学模型、外部实验信号和训练过程, 仅用系统的输入和输出数据进行设计, 不用解 Diophantine 方程, 在线计算量小, 实时性好, 不存在传统的未建模动态.

4) 该算法适应性强, 但约束条件很弱. 广义预测控制器 u(k) 算法稳定, 条件易满足, 算法中无须加入式(12) 进行强制约束. 参数自适应递推预报算法满足其稳定条件. 考虑假设 1 和假设 3, 要求式(3) 中 ϕ_{hui}(k - i) 或 u(k - i) (i = 0, ..., n_u) 不能同时等于零. 本算法自身即可满足此要求, 不用约束 ϕ_{ui}(k - i) = 0 或 u(k) = 0. 而文献[5, 7] 均需强制约束 ϕ_{ui}(k - i) = 0.

5 仿真结果

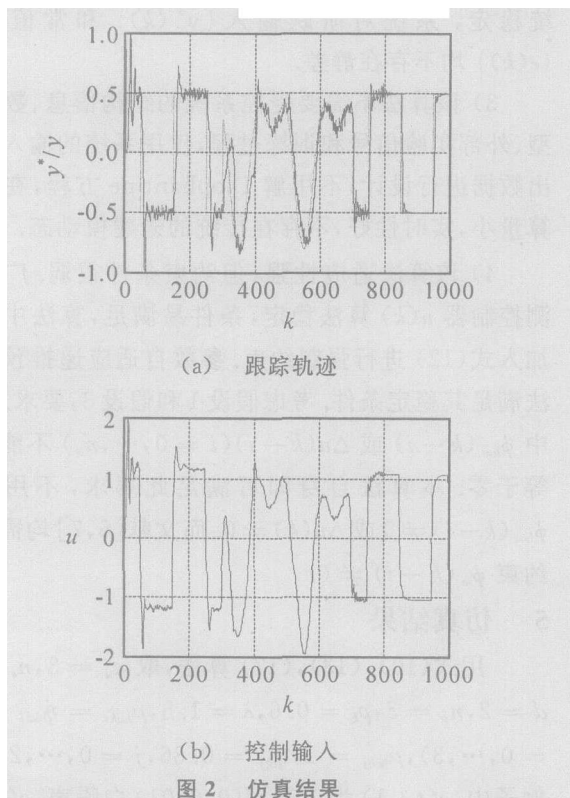
用式(10), (13), (17) 算法, 取 n_u = 3, n_e = 2, d = 2, n_p = 3, k = 0.6, β = 1.5, μ_{huki} = μ_{hki} = 1 (i = 0, ..., 3), μ_{hekj} = 1, α_{kj} = 0.36, j = 0, ..., 2. 仿真例子中, e(t + 1) 为正态 N(0, 0.01) 白噪声, e(t + 1) 的采样值由伪随机发生器产生. 为便于对比有无噪声情况, 在仿真后 200 步未加噪声干扰.

仿真算例如下:

$$y(k+1) = \begin{cases} \frac{y(k)}{1 + y(k)^2 + y(k-1)^2} + 0.14u(k-3)^3 + \\ 0.01u(k-6)^6 + e(k+1), k < 500; \\ \frac{0.1y(k-2)y(k-4)y(k-5)u(k-4)^3}{1 + y(k-1)^2} + \\ \frac{4^3(y(k-6)-1) + 0.3u(k-3)^3}{y(k-3)^2} + \\ e(k+1), 500 < k < 1000. \end{cases}$$

$$y^*(k+1) = \begin{cases} \pm 0.5, 0 < k < 300; \\ 700 < k < 1000, \text{见图2}; \\ 0.5\sin(k/100) + 0.3\cos(k/50), \\ 300 < k < 700. \end{cases}$$

$y(k+1)$ 为仿真模型输出, $y^*(k+1)$ 为系统期望输出值, 仿真结果如图 2 所示. 由仿真结果可知, 系统具有很强的鲁棒稳定性, 其表现为: (1) 算法参数 (k , μ_{huki} , t_{ski}) 及初值 ($u(i)$, $y(i)$, $e(i)$, $\phi_{hi}(i)$) 的取值范围相对较大, 取值敏感性相对较弱; (2) 仿真模型中时滞较大、信噪比较高时, 系统跟踪轨迹 $y(k)$ 及控制输入 $u(k)$ 仍然不发散, 只是仿真结果差些, 说明该算法抑制发散的能力很强; (3) 如采用文献[9]的线性逼近的非线性系统预测控制算法, 则仿真模型输出发散, 无法跟踪系统期望输出值.



6 结 语

本文基于动态非线性逼近模型, 提出了广义预测控制及参数自适应递推预报算法, 使此类研究更

具普遍意义, 可解决一类存在较大滞后的时滞非线性系统的广义预测控制问题. 该系统具有较强的鲁棒稳定性和稳态无偏性. 算法仅用受控系统的 I/O 数据进行设计, 约束条件很弱, 不存在传统的未建模动态. 仿真结果表明, 该方法是正确有效的.

参考文献(References)

- [1] Henson M A, Seborg D E. Theoretical analysis of unconstrained nonlinear model predictive control[J]. Int J Control, 1993, 58(5): 1053-1080.
- [2] Proll T, Karim M N. Real-time design of an adaptive nonlinear predictive controller[J]. Int J Control, 1994, 59(3): 863-889.
- [3] Toshiyuki Ohtsuka, Hironori A Fujii. Real-time optimization algorithm for nonlinear receding-horizon control[J]. Automatica, 1997, 33(6): 1147-1154.
- [4] 钟璇, 王树青. 基于远程预报辨识的非线性广义预测控制算法[J]. 自动化学报, 2000, 26(2): 267-273. (Zhong X, Wang S Q. Nonlinear generalized predictive control with long-range predictive identification [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(2): 267-273.)
- [5] Hou Z S, Huang W H. The model-free learning adaptive control of a class of nonlinear discrete-time system[J]. Control Theory & Application, 1998, 15(6): 893-899.
- [6] 胡致强. 一类多重时滞非线性系统的无模型学习自适应控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(2): 261-264. (Hu Z Q. Model-free learning adaptive control for nonlinear system with multiple delays[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(2): 261-264.)
- [7] 胡致强. 基于 M uler 法的非线性系统不依赖于受控系统模型的自适应控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(2): 51-54. (Hu Z Q. Model-free adaptive control for nonlinear system based on M uler method [J]. J of Harbin Engineering University, 2001, 22(2): 51-54.)
- [8] Hu Z Q. The adaptive control for a class of nonlinear systems based on dynamic approximate any higher-order nonlinearization[C]. IEEE Proc 4th WCICA. Shanghai, 2002: 682-686.
- [9] 胡致强. 基于动态线性逼近的非线性系统预测控制[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(3): 185-189. (Hu Z Q. The generalized predictive control for a class of nonlinear based on approximate linearization[J]. Electric Machines and Control, 2001, 5(3): 185-189.)
- [10] 赵建华, 沈永良. 一种自适应 PID 控制算法[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 417-420. (Zhao J H, Shen Y L. An adaptive PID control algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(3): 417-420.)