

文章编号: 1001-0920(2008)12-1373-05

空天飞行器的自适应变论域模糊预测控制

方 炜, 姜长生

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘 要: 考虑一类非线性不确定系统的变论域模糊预测控制问题. 根据跟踪误差在线调整伸缩因子, 使变论域模糊系统一致逼近被控对象中的未知干扰和不确定因素. 通过引入鲁棒自适应控制器, 消除了模糊建模误差, 提高了系统的动态性能. 基于泰勒展开的非线性预测控制律, 避免了繁重的计算负担. 基于 Lyapunov 理论, 给出了伸缩因子的调整律, 并证明了闭环系统一致最终有界. 最后, 将该算法用于空天飞行器 (ASV) 姿态控制系统的设计, 仿真结果表明了该算法的有效性.

关键词: 非线性不确定系统; 预测控制; 变论域模糊系统; 鲁棒自适应控制器; 空天飞行器

中图分类号: V294.1; TP293.2 **文献标识码:** A

Adaptive variable universe fuzzy predictive control for aerospace vehicle

FANG Wei, JIANG Chang-sheng

(Department of Automatic Control Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China. Correspondent: FANG Wei, E-mail: fwei2k@163.com)

Abstract: The design of variable universe fuzzy predictive control law to a class of uncertain nonlinear systems is considered. According to the tracking error, the contraction and expansion factor of variable universe fuzzy controller are tuned on-line, so the disturbances and uncertainties are estimated by the fuzzy system. Robust controller is constructed to attenuate fuzzy approximation errors and enhance the whole system performance. Based on Taylor equation, the adaptive predictive control law is achieved, the huge calculation burden of predictive control can be avoided. By using Lyapunov theory, the adjusting law of the contraction and expansion factor is given, and it has been proven that the closed-loop is uniformly ultimately bounded. Finally, the flight control system of aerospace vehicle under hypersonic condition is designed by using the proposed method. The results show the fine performance of the method.

Key words: Nonlinear uncertain system; Predictive control; Variable universe fuzzy systems; Robust adaptive controller; Aerospace vehicle

1 引 言

预测控制是 20 世纪 70 年代发展起来的一种基于模型的优化控制算法, 已广泛应用于化工、冶金等工业工程^[1,2]. 近几年来, 非线性预测控制理论得到了进一步的研究和发展. 文献[3]利用线性规划方法处理混合系统的非线性预测控制问题; [4]基于线性矩阵不等式求解预测控制律; [5]提出了一种新的具有闭合解析形式的非线性最优预测控制算法, 设计过程简单, 避免了预测控制的在线优化计算. 通常, 预测控制理论^[1,4,5]需知道非线性系统精确的数学

模型, 因此具有很大的局限性. 当系统存在干扰、建模误差等不确定因素时, 预测控制的控制性能将大大降低, 甚至失效.

近几年来, 利用模糊系统的一致逼近能力, 将模糊系统应用于非线性不确定系统的控制和辨识, 已成为理论界和工程界研究的热点^[6,7]. 但模糊系统参数的在线调整需大量的学习时间, 使控制器的设计变得更加复杂. 文献[8]结合监督控制器给出了变论域自适应模糊控制, 通过调节伸缩因子生成大量的模糊规则, 有效地提高了系统的控制精度.

收稿日期: 2007-08-22; 修回日期: 2007-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(90405011).

作者简介: 方炜(1977—), 男, 安徽桐城人, 博士生, 从事非线性预测控制、模糊自适应控制等研究; 姜长生(1946—), 男, 江苏六合人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制、智能控制等研究.

基于上述分析,本文在文献[8]的基础上,结合预测控制方法^[5]和模糊系统理论,提出一种非线性自适应变论域模糊预测控制方法.通过论域伸缩因子的自适应调整使得模糊系统逼近被控对象的复合干扰,同时引入一个鲁棒自适应控制器,用于消除模糊建模误差对系统的影响,从而提高系统的动态性能.该算法的优点是整个系统只需在线调整两个自适应参数,减轻了控制器的计算负担,使控制器更易于工程实现和调试,且无需知道建模误差的上界,降低了控制律的保守性.基于 Lyapunov 理论,给出了模糊系统伸缩因子的调整律,并证明了闭环系统所有信号一致最终有界稳定.最后,利用该方法对空天飞行器(ASV)再入飞行的姿态控制进行仿真,仿真结果表明了该方法的有效性.

2 系统描述

本文考虑一类非线性不确定系统

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x) + g_1(x)u + g_2(x)d(x), \\ y(t) &= h(x). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n, u \in R^p, y \in R^m$ 分别为系统的状态、输入和输出; $d(x) \in R^n$ 表示未知的建模误差和外界干扰组成的复合干扰; $f(x), g_1(x), g_2(x)$ 为适当维数的光滑有界函数.

对系统(1)作如下假设:

假设 1 系统的输出信号和参考信号对时间 t 连续可微.

假设 2 系统零动态稳定.

假设 3 复合干扰和控制输入具有相同的相对度.

定义系统滚动优化性能指标如下:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T e^T(t+\tau)e(t+\tau) d\tau. \quad (2)$$

其中: T 为滚动预测时间段,跟踪误差

$$e(t+\tau) = y(t+\tau) - y_r(t+\tau), \quad (3)$$

$y(t+\tau)$ 为预测时间段的预测输出, $y_r(t+\tau)$ 为预测时间段的期望输出.

3 非线性预测控制^[5]

非线性预测控制采用滚动优化的控制算法,通过对性能指标(2)求最优确定未来的控制量,以达到系统(1)的输出 $y(t)$ 最优跟踪期望的参考轨迹 $y_r(t)$ 的目的.控制矢量 $u(t)$ 的控制阶取为 r ,将系统输出求导至 r 次,则有

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= L_f h(x), \\ &\dots \\ y^{(r-1)}(t) &= L_f^{r-1} h(x), \\ y^{(r)}(t) &= L_f^r h(x) + L_{g_1} L_f^{r-1} h(x) u + L_{g_2} L_f^{r-1} h(x) d, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y^{(r+1)}(t) &= L_f^{r+1} h(x) + p_{11}(u, x, d) + L_{g_1} L_f^r \dot{u}, \\ &\dots \\ y^{(r+l)}(t) &= L_f^{r+l} h(x) + p_{r1}(u, x, d) + p_{r2}(\dot{u}, u, x, d) + \\ &\dots + p_{rr}(u^{(r-1)}, \dots, u, x, d) + L_{g_1} L_f^{r-1} h(x) u^{(r)}. \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $p_{11}, p_{21}, p_{22}, \dots, p_{r1}, \dots, p_{rr}$ 是关于 $u, \dot{u}, \dots, u^{(r-1)}, d$ 的复杂非线性函数.由于干扰 d 是未知量,这里假设 $\dot{d}, \dots, d^{(r)} = 0$.

在滚动预测时域内,任一时刻系统的输出 $y(t+\tau)$ 和参考轨迹 $y_r(t+\tau)$ 可根据 Taylor 级数进行展开,对性能指标(2)求最优,可推导出具有闭合解析形式的预测控制律

$$u(t) = - (G(x))^{-1} (F(x) + KM - y_r^{(r)}(t) + w). \quad (5)$$

其中: $F(x) = L_f h(x), G(x) = L_{g_1} L_f^{r-1} h(x)$, 且非奇异、范数有界, $w = L_{g_2} L_f^{r-1} h(x) d$, 向量 M 和矩阵 K 的定义参见文献[5].

4 控制器设计及稳定性分析

式(5)中含有未知变量 w ,因而控制器不可实现.虽然预测控制采用了滚动优化的控制策略,对扰动有一定的鲁棒性,但对于难以准确建模且运行环境恶劣的实际系统,干扰的大小难以估计.随着 w 的增大,预测控制的性能将不断下降,直至失效,因此必须引入新的控制策略,具体方案如图 1 所示.此时的控制器为

$$u = u_p + u_f + u_{ad}. \quad (6)$$

其中

$$u_p = - (G(x))^{-1} (F(x) + KM - y_r^{(r)}(t)), \quad (7)$$

$$u_f = - (G(x))^{-1} v_f, \quad (8)$$

$$u_{ad} = - (G(x))^{-1} v_{ad}. \quad (9)$$

这里: u_p 为预测控制器; v_f 为变论域模糊系统的输出,用于逼近复合干扰 w ; v_{ad} 为鲁棒自适应控制器,具体形式将在后面的分析中给出.

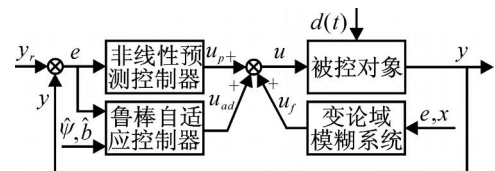


图 1 非线性鲁棒自适应预测控制结构

4.1 变论域模糊系统逼近理论

变论域模糊控制是指在模糊规则形式不变的前提下,论域随着误差的变小而收缩,随着误差的增大而膨胀.输入变量和输出变量的初始论域为

$$X_i = [-E \ E], Y = [-U \ U]. \quad (10)$$

变换后论域的形式为

$$\begin{aligned} X_i(x_i) &= [-a_i E_i \quad a_i E_i], \\ Y &= [-bU \quad bU]. \end{aligned} \quad (11)$$

其中: a_i 和 b 称为论域的伸缩因子; $a_i, b \in [0, 1]$. 通常选择如下伸缩因子:

$$a_i = 1 - \exp(-ke^2), \quad (0, 1), \quad k > 0. \quad (12)$$

设 $w_k(x)$ 为 $w(x)$ 的第 k 个元素, $k = 1, 2, \dots, m$, 用于逼近 $w_k(x)$ 的模糊系统由模糊规则构造, 其中第 i 条规则为

r_k^i : If x_1 is A_{k1}^i , and x_2 is A_{k2}^i , and ..., and x_n is A_{kn}^i ,

Then y_k is i_k , $i = 1, 2, \dots, l_k$, $k = 1, 2, \dots, m$,

其中 l_k 为模糊系统的规则数. 模糊系统的输出可定义为

$$\hat{w}_k(x) = \sum_{i=1}^{l_k} i_k^i(x) = \sum_{i=1}^{l_k} i_k(x) \cdot k. \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} k &= [1, 2, \dots, l_k]^T, \\ k(x) &= [k_1(x), k_2(x), \dots, k_{l_k}(x)]^T, \\ i_k^i(x) &= \prod_{j=1}^n \mu_{a_j^i}(x_j / a) / \prod_{i=1}^{l_k} \left(\prod_{j=1}^n \mu_{a_j^i}(x_j / a) \right). \end{aligned} \quad (14)$$

这里: $i_k^i(x)$ 称为模糊基函数, $\mu_{a_j^i}(x_j / a)$ 为带伸缩因子的隶属函数. 因此, 变论域自适应模糊系统的输出为

$$\hat{w}(x / b) = b(x) = b^T(x). \quad (15)$$

其中: $b = [1^T, 2^T, \dots, m^T]^T$, $(x) = \text{diag}(1(x), 2(x), \dots, m(x))$.

假设 4^[8] 对于任意 $x \in M_x$, 其中 M_x 为一紧集, 变论域模糊系统的最优参数

$$b^* = \arg \min_b \sup_{M_b} |w - \hat{w}(x / b)|, \quad (16)$$

且最优参数 b^* 在凸区域

$$M_b = \{b \mid |b| \leq M_0\} \quad (17)$$

上, 其中常数 $M_0 > 0$, 则复合干扰

$$w = \hat{w}(x / b^*) + \dots \quad (18)$$

4.2 鲁棒自适应控制器设计

将式(6)代入(4)中的 $y^{(l)}(t)$, 经过变换可得

$$\begin{aligned} \dot{e} &= Ae + B(w - v_f - v_{ad}) = \\ &Ae + B(\hat{w}(x / b^*) - \hat{w}(x / b) + \dots - v_{ad}). \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} e &= (e_1, e_2, \dots, e_m)^T \in R^m, \\ e_i &= [e_i, e_i^2, \dots, e_i^{l-1}]^T, \\ A &= \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_m) \in R^{m \times m}, \end{aligned}$$

$$B = \text{diag}(B_1, B_2, \dots, B_m) \in R^{m \times m},$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ -k_{i,0} & -k_{i,1} & -k_{i,2} & \dots & -k_{i,l-1} \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

这里: $k_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 为矩阵 K 的第 i 行元素, 其取值由预测时域 T , 相对阶 l 以及控制阶 r 决定. 根据文献[5], 可选择合适的参数,

$$h(e) = e_i^{l-1}(t) + k_{i,l-1}e_i^{l-2}(t) + \dots + k_{i,0} \quad (20)$$

为 Hurwitz 多项式. $\tau = [1, 2, \dots, m]$ 为模糊系统的逼近误差, $\bar{\tau}$ 为逼近误差的上界, 不妨令 $\bar{\tau} = \tau$.

考虑如下鲁棒自适应控制器:

$$v_{ad} = \hat{\tau} \tanh(\hat{s} / \tau). \quad (21)$$

其中: $\hat{\tau}$ 为 τ 的估计值; $s = B^T P e$, $P = \text{diag}(P_1, P_2, \dots, P_m) \in R^{m \times m}$, P_i 为满足下列等式的正定对称阵:

$$P_i A_i + A_i^T P_i = -Q_i, \quad Q_i = Q_i^T > 0, \quad (22)$$

Q_i 和 τ 为设计参数.

4.3 稳定性分析

引理 1^[9] 对于任意的 $c > 0$ 和 $z \in R$, 有下列不等式成立:

$$0 < |z| - z^T \tanh(z/c) < c, \quad (23)$$

其中 c 是常数, 满足 $c = e^{-c}$, 即 $c = 0.2785$.

定理 1 对于满足假设 1 ~ 假设 3 的系统(1), 通过选择合适的预测时域 T 和控制阶 r , 取形如式(6)的控制律, 在如下参数自适应律的作用下:

$$\dot{b} = b(s^T(x) - b(b - b_0)), \quad (24)$$

$$\dot{\hat{\tau}} = (\hat{\tau} - \tau) s, \quad (25)$$

闭环系统所有信号一致最终有界. 其中: 正实数 b_0 和 τ_0 为 b 和 τ 的初值. 对于给定的 $\epsilon > \sqrt{2c_2 / (\max(P) c_1)}$, 存在时间 $T > 0$, 对于 $t \geq t_0 + T$, 有 $\|e\| < \epsilon$. 其中

$$c_1 = \min(\min(Q) / \max(P), b_0, \tau_0), \quad (26)$$

$$c_2 = \frac{1}{2} b(b^* - b_0)^2 + \frac{1}{2} (\tau - \tau_0)^2 + \dots \quad (27)$$

证明 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2} \tilde{b}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\tau}^2. \quad (28)$$

其中: $\tilde{b} = b^* - b, \tilde{\Lambda} = \Lambda - \hat{\Lambda}$.

将 V 沿着系统的轨迹求得

$$\dot{V} = \frac{1}{2} e^T (PA + A^T P) e + \tilde{b}^T PB(x) + e^T PB(-v_{ad}) - \tilde{b}^T \tilde{b} \dot{b} - \tilde{\Lambda}^T \dot{\Lambda} \quad (29)$$

根据式(22),可将上式写为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} \min(Q) e^2 + \tilde{b}^T (x) + s^T (-v_{ad}) - \tilde{b}^T \tilde{b} \dot{b} - \tilde{\Lambda}^T \dot{\Lambda} \\ &= \frac{1}{2} \min(Q) e^2 + \tilde{b}^T (x) + s^T (-v_{ad}) - \tilde{b}^T \tilde{b} \dot{b} - \tilde{\Lambda}^T \dot{\Lambda} \end{aligned} \quad (30)$$

由引理1得

$$-s^T v_{ad} = -\Lambda s^T \tanh(\Lambda s / \epsilon) = -\Lambda s + \epsilon \quad (31)$$

将其代入式(30)得

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \min(Q) e^2 - \tilde{b}(\dot{b} - s^T(x)) - \tilde{\Lambda}(\dot{\Lambda} - s) + \epsilon \quad (32)$$

根据自适应律(24)和(25),式(32)可写为

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \min(Q) e^2 + \tilde{b}(b - b_0) + \tilde{\Lambda}(\Lambda - \Lambda_0) + \epsilon \quad (33)$$

考虑到

$$\begin{aligned} \tilde{b}(b - b_0) &= \tilde{b}(b^* - b_0) - \tilde{b}^2 \\ &= \frac{1}{2} \tilde{b}^2 + \frac{1}{2} (b^* - b_0)^2 \\ \tilde{\Lambda}(\Lambda - \Lambda_0) &= \frac{1}{2} \tilde{\Lambda}^2 + \frac{1}{2} (\Lambda - \Lambda_0)^2 \end{aligned} \quad (34)$$

有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} \min(Q) e^2 - \frac{1}{2} \tilde{b}^2 - \frac{1}{2} \tilde{\Lambda}^2 + \frac{1}{2} (b^* - b_0)^2 + \frac{1}{2} (\Lambda - \Lambda_0)^2 + \epsilon \\ &= -c_1 V + c_2 \end{aligned} \quad (35)$$

由上式可得

$$V(t) \leq \frac{c_2}{c_1} + (V(t_0) - \frac{c_2}{c_1}) e^{-c_1(t-t_0)} \quad (36)$$

因此闭环系统所有信号一致最终有界,并且对于任意给定的 $\epsilon > \sqrt{2c_2 / (\max(P) c_1)}$,若存在时间 $T > 0$ 使所有 $t = t_0 + T$,则 $e < \epsilon$.

注1 理论上可通过选取足够多的模糊规则使模糊系统精确逼近复合干扰 w ,但在实际应用中,往往很难做到这一点.由以上分析可知,通过选择合适的自适应参数,也可保证整个闭环系统稳定,并取得一定的控制性能.

5 仿真算例

5.1 仿真模型

文献[10]提出了ASV高超声速飞行仿真模型.考虑ASV作高超声速再入飞行,主发动机推力设为0.根据时标分离的原则,将ASV的姿态运动方程分成内外回路,内回路的状态变量 $x_f(t) = [p, q, r]^T$,气动力矩 $[l, m, n]^T$ 为控制变量;外回路的状态变量 $x_s(t) = [\alpha, \mu]^T$,控制变量为内回路的输入指令 $[p_c, q_c, r_c]^T$.

假设由于ASV气动参数的摄动以及外界干扰的影响,ASV的姿态运动方程存在不确定项.控制器的设计目标为:根据跟踪优化性能指标(2),利用本文算法设计出姿态角跟踪所需的气动力矩,并通过分配算法将其映射成ASV的舵面指令信号 $[a_c, c_c, r_c]^T$,使ASV的姿态角 $[\alpha, \mu]^T$ 快速跟踪期望的姿态角指令信号 $[c_c, c_c, \mu_c]^T$.

5.2 控制器设计

5.2.1 外回路控制器设计

外回路的相对阶 $\rho = 1$,选择控制阶 $r = 0$,预测时间段 $T = 0.7$ s.根据第4节内容, x_s 每个变量采用7个模糊语言变量: A_j^1 (NB), A_j^2 (NM), A_j^3 (NS), A_j^4 (Z), A_j^5 (PS), A_j^6 (PB), A_j^7 (PB),对应的隶属函数 $\mu_{A_j^i}(x_j) = \exp\{-(x_j - \mu_i)^2\}$. (37) 其中: $i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, 3; \mu_i = -0.5, -0.3, -0.1, 0, 0.1, 0.3, 0.5$.

分别使用25条模糊规则逼近复合干扰 $w(x)$ 中的各个元素.其他设计参数为: $Q = 5I_{3 \times 3}, b = 10, b = 1, b_0 = 0 = 0.2, \epsilon = 0.02$,伸缩因子参数 $\gamma = 0.7, k = 1$.

5.2.2 内回路控制器设计

内回路控制器设计与外回路的设计方法类似,这里不再赘述.预测控制器的控制阶 $r = 0$,预测时间段 $T = 0.3$ s.其他设计参数为: $Q = 15I_{3 \times 3}, b = 20, b = 0.1, b_0 = 0 = 0.5, \epsilon = 0.01$,伸缩因子参数 $\gamma = 0.5, k = 1$.

5.3 仿真结果

ASV飞行速度为3000 m/s,高度为40 km.初始姿态为: $\alpha = 15^\circ, c = 1^\circ, \mu = 4^\circ, p = q = r = 0$;姿态指令信号为: $c = 13^\circ, c = 0^\circ, \mu_c = 1^\circ$.舵面偏转范围为 $\pm 30^\circ$.假设ASV的气动参数 C_D 存在30%的不确定, C_L 存在10%的不确定,且ASV的内回路存在不确定力矩 $(4 \times 10^4 \sin 2t; 3 \times 10^4 \cos 2t; 5 \times 10^4 \sin 2t)$ N·m.仿真结果如图2~图4所示.

图2为当ASV受到不确定和外界力矩干扰时,根据文献[5]中算法设的ASV姿态角和控制舵面的响应曲线,可以看出非线性预测控制的控制性能明

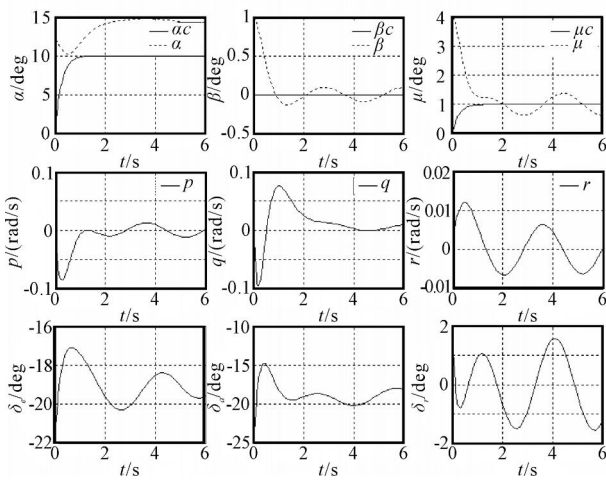


图 2 不确定条件下的非线性最优预测控制的控制性能

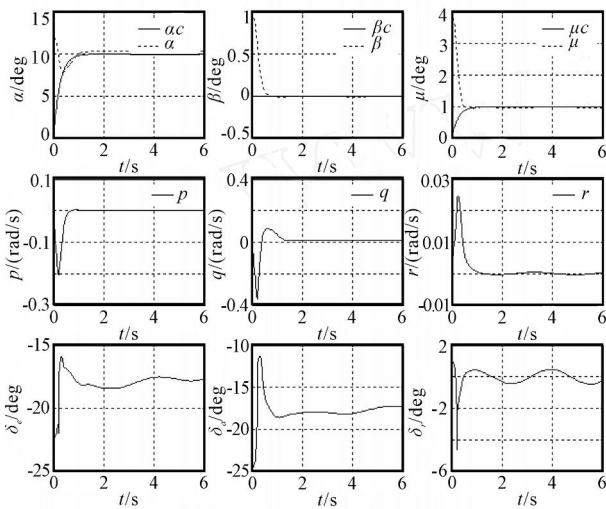


图 3 自适应变论域模糊预测控制的控制性能

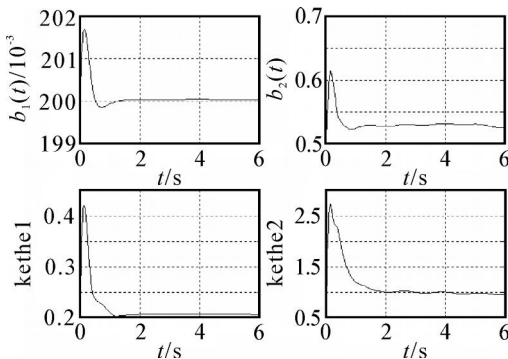


图 4 自适应参数的响应曲线

显变坏,ASV 失去控制。可见在高超声速飞行条件下,ASV 对气动参数的变化和系统不确定因素较敏感,非线性预测控制律无法满足 ASV 对控制精度和鲁棒性的要求。图 3 为根据本文算法设计的控制器仿真曲线,外界干扰和系统不确定组成的复合干扰得到了很好的抑制,系统的动态性能和稳态性能有了明显提高。图 4 为 ASV 快慢回路的自适应参数 b 和 \wedge 的响应曲线,随着闭环系统趋于稳定,自适应参

数也趋于各自的稳态值。

6 结 论

本文讨论了一类不确定非线性系统的变论域模糊预测控制问题。基于可变论域的思想,结合非线性预测控制与模糊系统理论,设计了一种鲁棒自适应预测控制器。给出了模糊系统伸缩因子的自适应调整律,并进行了严格论证,保证系统对不确定性和干扰具有鲁棒性,且控制器在线调节参数较少,便于工程实现与调试。最后,通过对 ASV 再入飞行姿态控制的仿真验证了该方法的有效性。

参考文献(References)

[1] Silvina I B, Jorge A S, Jos e L F. Use of state estimation for inferential nonlinear MPC: A case study [J]. J of Chemical Engineering, 2005, 106(1) : 13-24.

[2] Leyla O. Mayuresh V K. Stability analysis of a multi-model predictive control algorithm with application to control of chemical reactors [J]. J of Process Control, 2006, 16(2) : 81-90.

[3] Necoara I, Schutter B D, Boom T, et al. Model predictive control for perturbed continuous piecewise affine systems with bounded disturbances[C]. The 43rd IEEE Conf on Decision and Control. Bahamas, 2004: 1848-1853.

[4] Michael T F, Qian C J. Receding horizon control of a linear parameter varying model of the raptor 50 helicopter[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf and Exhibit. San Francisco, 2005, 6372: 1-17.

[5] Chen W H, Donald J B, Peter J G. Optimal control of nonlinear systems: A predictive control approach [J]. Automatica, 2003, 39(6) : 633-641.

[6] Chi H W, Tsung C L, Tsu T L, et al. Adaptive hybrid intelligent control for uncertain nonlinear dynamical systems [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 2002, 32(5) : 583-597.

[7] 王银河,李志远. 一类基于模糊逻辑系统的非线性系统自适应跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2004, 19(10) : 1121-1124.
(Wang Y H, Li Z Y. Adaptive tracking control for a class of nonlinear systems based on fuzzy logic systems [J]. Control and Decision, 2004, 19(10) : 1121-1124.)

[8] 王江,乔国栋,邓斌. 变论域自适应模糊控制及其在 Chuaps 混沌电路中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3) : 433-438.
(Wang J, Qiao G D, Deng B. Variable universe adaptive fuzzy control and its application for Chua's chaotic circuit [J]. Control Theory and Applications, 2006, 23(3) : 433-438.)

(下转第 1388 页)

- (Luo K, Lin M G, Tong X J. Decoupled semismooth Newton algorithm for optimal power flow problems[J]. Control and Decision, 2006, 21(5) : 580-584.)
- [4] 罗可, 童小娇. 求解最优潮流 KKT 系统的一类新模型及算法设计[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2) : 245-250.
(Luo K, Tong X J. New model and algorithm for solving the KKT system of optimal power flow [J]. Control Theory and Applications, 2006, 23(2) : 245-250.)
- [5] Gan De-qiang, Thomas R J, Zimmerman R D. Stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2) : 535-540.
- [6] 孙元章, 杨新林, 王海风. 考虑暂态稳定性约束的最优潮流问题[J]. 电力系统自动化, 2005, 2(16) : 56-59.
(Sun Y Z, Yang X L, Wang H F. Optimal power flow with transient stability constraints in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 2(16) : 56-59.)
- [7] Momoh J A, Koesslwer R J, Bond M S. Challenges to optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1) : 444-447.
- [8] Kita H, Nishiya K, Hasegawa J. On-line preventive control for power systems based on energy function method[J]. Electrical Engineering in Japan, 1991, 111(7) : 30-39.
- [9] 孙景强, 房大中, 钟德成. 暂态稳定约束下的最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2001, 25(13) : 17-21.
(Sun J Q, Fang D Z, Zhong D C. Optimal power flow with transient stability constraints [J]. Proc of the CSEE, 2001, 25(13) : 17-21.)
- [10] Davaid A K, Lin Xu-jun. Dynamic security enhancement in power market systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2) : 431-438.
- [11] Yuan Y, Kubokawa J, Sasaki H. A solution of optimal power flow with multicontingency transient stability constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3) : 1094-1102.
- [12] Gan D, Thomas R J, Zimmerman R D. Stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2) : 535-540.
- [13] Chen L, Tada Y, Okamoto H, et al. Optimal operation solution of power system with transient stability constraints [J]. IEEE Trans on Circuits & Systems-I : Fundamental and Applications, 2001, 48(3) : 327-339.
- [14] 陈洛南, 多田泰之, 冈本浩, 等. 基于经济和稳定的电力系统最优运行策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10) : 8-13.
(Chen L N, Tada Y, Okamoto H, et al. Optimal operation solution of power system with transient stability constraints [J]. IEEE Trans on Circuits & Systems-I : Fundamental and Applications, 2004, 28(10) : 8-13.)
- [15] Wu S Y, Li D H, Qi L Q, et al. An iterative method for solving KKT system for the semi-infinite programming[J]. Optimization Methods and Software, 2005, 20(6) : 629-643.
- [16] Qi L Q, Ling C, Tong X J, et al. A smoothing projected Newton-type algorithm for semi-infinite programming [J]. J of Computational Applied Mathematics, 2008, 217(2) : 432-447.
- [17] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
(Yuan Y X, Sun W Y. Optimal theory and methods [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1997.)

(上接第 1377 页)

- [9] 张春雨, 方炜, 姜长生. 基于 T-S 模糊系统的空天飞行器鲁棒自适应轨迹线性化控制[J]. 航空学报, 2007, 28(5) : 1153-1161.
(Zhang C Y, Fang W, Jiang C S. Robust adaptive trajectory linearization control of an aerospace vehicle based on T-S fuzzy system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5) : 1153-1161.)
- [10] 朱亮, 姜长生, 陈海通, 等. 基于单隐层神经网络的空天飞行器直接自适应轨迹线性化控制[J]. 宇航学报, 2006, 27(3) : 338-344.
(Zhu L, Jiang C S, Chen H T, et al. Direct adaptive trajectory linearization control of aerospace vehicle using SHLNN [J]. J of Astronautics, 2006, 27(3) : 338-344.)