

文章编号: 1671-7848(2013)02-0204-05

近空间飞行器鲁棒自适应 backstepping 设计

张 强^{1,2}, 吴庆宪¹, 姜长生¹, 王玉惠¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 济南大学 自动化与电气工程学院, 山东 济南 250022)



摘 要: 针对变后掠翼近空间飞行器(near space vehicle, NSV)在大包络、多任务模式飞行运动过程中具有非线性、快时变、强耦合和不确定的特性,提出了基于径向基神经网络(radial basis function neural network, RBFNN)的鲁棒自适应跟踪控制策略。首先,利用 RBFNN 在线逼近 NSV 飞行过程中外部干扰。其次,应用 backstepping 设计光滑的反馈控制器。其中,采用微分器避免 backstepping 设计中出现微分膨胀问题,利用鲁棒项减少 RBFNN 估计误差对系统的影响。然后,通过公共 Lyapunov 函数证明所提出的控制器可以保证在任意飞行模态中 NSV 的输出跟踪误差均可以收敛到任意小的有界集内。最后,仿真结果表明该飞控系统具有良好的控制性能。

关 键 词: 切换非线性系统; 反馈递推; 自适应神经网络; 近空间飞行器

中图分类号: TP 27

文献标识码: A

Robust Adaptive Backstepping Design for Near Space Vehicle

ZHANG Qiang, WU Qing-xian, JIANG Chang-sheng, WANG Yu-hui

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: The variable-sweep wings near space vehicle (NSV) has nonlinearity, time variability, coupling and uncertainty, especially in large flight envelop and multi-task modes. So based on radial basis function neural network (RBFNN), robust adaptive tracking control is presented. Firstly, RBFNN are employed to compensate for unknown disturbance in the process of flight. Secondly, a adaptive backstepping method is then used to design the smooth feedback controller, in which the differentiator is used to avoid differential expansion problems in the backstepping design and robust term is to reduce the impact of estimation error from the RBFNN. Then, by using the Common Lyapunov function approach, we prove that the tracking error in the different flight modes can converges to an arbitrary small neighbourhood of the desired trajectory. Finally, the simulation results are presented to show the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: switched nonlinear systems; backstepping; adaptive neural networks; near space vehicle

1 引 言

近空间(Near Space)一般指距地面 20~100 km 的空域,并称在该空域内持续飞行且完成一定使命的飞行器为“近空间飞行器(near space vehicle, NSV)”^[1-2]。与此同时,由于变体飞行器具备根据飞行环境和飞行任务的变化,相应地改变外形,能始终保持最优飞行状态的特点,因此得到了广泛地研究。如: AFTI/F111 自适应机翼项目,主动柔性翼(AFW)计划,智能机翼(smart wing)项目和欧洲的 3AS(Active Aeroelastic Aircraft Structure)研究项目等^[3-4]。

近年来,切换系统控制问题的研究已取得不少成果^[5-9]。其中,公共 Lyapunov 函数是针对任意切换信号下设计稳定控制器的主要工具。文献[7]针对一类仿射非线性系统给出了控制律设计思想,但其要求系统平衡点具有已知的稳定收敛域,并且构造的控制律是不光滑的。对于基于时间序列的切换系统,文献[8]利用公共 Lyapunov 函数设计了控制器,并给出系统平均驻留时间。但二者均未考虑切换非线性系统存在未知干扰问题。

为实现 NSV 大包络飞行要求,文献[10]给出的其运动学模型是一类特殊的切换非线性系统。同时需注意的是在模型切换瞬间,必须保证高速飞行

收稿日期: 2012-05-22; 收修定稿日期: 2012-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(90716028, 60974106); 国家自然青年科学基金(11102080); 济南大学科研基金(XKY0916); 航空科学基金(20095152028); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目资助(NS2010077)

作者简介: 张 强(1980-),男,黑龙江佳木斯人,博士,讲师,主要从事飞行控制等方面的教学与科研工作; 吴庆宪(1955-),男,江苏扬州人,教授,博士生导师; 姜长生(1942-),男,教授,博士生导师; 王玉惠(1980-),女,蒙古族,副教授,硕士生导师。

的 NSV 控制力矩的连续性。否则可能会造成飞行状态不稳定, 甚至会产生飞行事故。因此, 本文首先利用径向基神经网络 (radial basis function neural network, RBFNN) 在线逼近 NSV 飞行过程中外部干扰。其次, 将 RBFNN 在线估计未知干扰与回馈递推 (backstepping) 设计方法相结合, 给出光滑且单一的鲁棒跟踪控制器设计方法, 以实现受扰 NSV 姿态控制。其中, 采用微分器避免 backstepping 设计中出现微分膨胀问题, 利用鲁棒项减少 RBFNN 估计误差对系统的影响。然后, 通过公共 Lyapunov 函数, 证明了所提出的控制方法可以保证在任意切换信号下 NSV 的输出跟踪误差均可以在有限时间内收敛到任意小的有界集内。仿真验证了该方法的有效性。

2 NSV 数学模型

本文研究的 NSV 气动模型, 如图 1 所示^[10]。

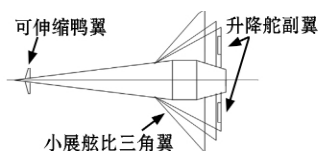


图 1 NSV 气动模型

Fig. 1 Aerodynamic model of near space vehicle

NSV 具有单垂尾方向舵、左右升降副翼操纵面。为提高其飞行的气动效率, 采用伸缩鸭翼加变后掠三角翼的结构, 可以得到很好的亚声速和超声速性能。其具体变形过程为: 亚声速阶段水平全动鸭翼展开, 机翼后掠角为 40° ; 超声速阶段水平鸭翼收回机体内, 机翼后掠角增大至 60° ; 高超声速阶段水平鸭翼仍完全存于机体内部, 机翼后掠角继续增大至 75° 。

根据奇异摄动理论, 可得到 NSV 的仿射非线性方程组如下:

$$\dot{\Omega} = f_s^{\sigma(t)} + g_s \omega + d_s(t) \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = f_f^{\sigma(t)} + g_f^{\sigma(t)} M_c + d_f(t) \quad (2)$$

$$y = \Omega \quad (3)$$

式中, $\Omega = [\alpha \ \beta \ \mu]^T$ 和 $\omega = [p \ q \ r]^T$ 分别为姿态角和角速率; $\sigma(t): [t_0, \infty) \rightarrow M = (1 \ 2 \ 3)$ 为后掠翼或鸭翼变形切换信号; $f_s^{\sigma(t)} = [f_\alpha^{\sigma(t)}, f_\beta^{\sigma(t)}, f_\mu^{\sigma(t)}]^T$ 和 $f_f^{\sigma(t)} = [f_p^{\sigma(t)}, f_q^{\sigma(t)}, f_r^{\sigma(t)}]^T$ 为光滑向量场; g_s 和 $g_f^{\sigma(t)}$ 为控制增益矩阵; $M_c = [l_{ctrl} \ m_{ctrl} \ n_{ctrl}]^T$ 为滚转、俯仰和偏航方向上的控制力矩; $d_s(t)$ 、 $d_f(t)$ 为 NSV 系统的未知外干扰。限于篇幅, 其他符号意义见文献[10]。

定义 $x_1 \in [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$, $x_2 \in [z_4 \ z_5 \ z_6]^T$, $\mu \in M_c$, $d_1(t) \in d_s(t)$, $d_2(t) \in d_f(t)$, $z_1 = \alpha$, $z_2 = \beta$, $z_3 = \mu$, $z_4 = p$, $z_5 = q$, $z_6 = r$, 则式(1)~(3)所描述的 NSV 系

统可以化为如下的切换非线性系统形式:

$$\dot{x}_1 = f_1^{\sigma(t)}(x_1) + g_1(x_1)x_2 + d_1(t) \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = f_2^{\sigma(t)}(x_1, x_2) + g_2^{\sigma(t)}(x_1, x_2)u + d_2(t) \quad (5)$$

$$y = x_1 \quad (6)$$

记 $\bar{x}_2 = [x_1^T \ x_2^T]^T$ 。为设计光滑且单一的鲁棒自适应控制器, 需做如下合理假设:

假设 1 系统所有状态是可测量的, 且有输出 $y(t)$ 和参考信号 $y^d(t)$ 关于时间连续可微有界的。

假设 2^[11] 令 $x \in M_x$, 其中, M_x 是系统状态的一个紧集, 神经网络的最优权值 W^* 可以定义为如下形式:

$$W^* = \operatorname{argmin}_{\hat{W} \in S_d} [\sup_{x \in M_x} \|\hat{d}(x|\hat{W}) - d(x)\|] \quad (7)$$

$$S_d = \{\hat{W}: \|\hat{W}\|_F \leq M\} \quad (8)$$

式中, M 是设计参数; S_d 是权值参数的可行域; d 是需逼近的未知干扰; \hat{W} 是神经网络的权值; 而且 $\hat{d}(x|\hat{W})$ 是神经网络的输出。

为方便起见, 在不引起歧义的情况下, 省略相关变量的自变量, 如 $g_1(x_1)$ 简写为 g_1 。

NSV 姿态控制器的设计目的是针对 NSV 在大包络、多任务飞行中易受外干扰及外形变化过程中需保持控制力矩连续性的问题, 将在线 RBFNN 与 backstepping 相结合, 给出光滑且单一的鲁棒复合控制器, 以此实现受扰 NSV 输出姿态角 $y(t)$ 渐进地跟踪姿态角命令指令 $y^d(t)$ 。

3 控制器设计

1) 慢回路控制器设计 令 $e_1 = y(t) - y^d(t)$ 。

根据式(4)有:

$$\dot{e}_1 = f_1^i + g_1 x_2 + d_1 - \dot{y}^d \quad i \in M \quad (9)$$

令 $V_{e1} = \frac{1}{2} e_1^T e_1$, 对其求导并带入式(9)可得:

$$\dot{V}_{e1} = e_1^T (f_1^i + g_1 x_2 + d_1 - \dot{y}^d) \quad i \in M \quad (10)$$

在假设 2 下, 通过慢回路 RBFNN 来逼近未知干扰 d_1 , 则式可以表示为

$$\dot{V}_{e1} = e_1^T (f_1^i + g_1 x_2 + W_1^{*T} S_1(x_1, p_1, \delta_1) + \varepsilon_1 - \dot{y}^d) \quad i \in M \quad (11)$$

式中, $W_1^* \in \mathbf{R}^{l_1 \times 3}$ 是慢回路 RBFNN 理想权值矩阵; $v_1 = [v_{11}^T, \dots, v_{1l_1}^T]^T$, $\delta_1 = [\delta_{11}, \dots, \delta_{1l_1}]^T$; $S_1(\cdot) = [S_{11}(\cdot), \dots, S_{1l_1}(\cdot)]^T \in \mathbf{R}^{l_1}$ 是 RBFNN 基函数向量, 其中, $S_{li}(\cdot) = \exp(-\|x_1 - v_{li}\|^2 / \delta_{li}^2)$; v_{li} 和 δ_{li} ($1 \leq i \leq l_1$) 分别是慢回路 RBFNN 第 i 个隐层节点的中心矢量和宽度; $l_1 \in N$ 是隐层节点个数; $\varepsilon_1 = d_1 - W_1^{*T} S_1(x_1, p_1, \delta_1)$ 是慢回路 RBFNN 理想逼近误差, 记 $\bar{\varepsilon}_1$ 是其 2-范数的未知上确界, 即满足: $\sup \|\varepsilon_1\| \leq \bar{\varepsilon}_1$ 。

在假设 1 下, 将 x_2 作为虚拟控制输入, 且选择理想虚拟控制量 x_2^* 为

$$\dot{x}_2^* = g_1^{-1}(-A_1 e_1 - \phi(x_1) e_1 - \hat{W}_1^T S_1 + y^d - r_1) \quad (12)$$

式中, $A_1 > 0$ 、 $\phi(x_1) > 0$ 分别为设计的适当维数正定矩阵和将要设计光滑函数; \hat{W}_1 为 W_1^* 的估计值; r_1 是为了消除由于估计误差的影响而引入的慢回路鲁棒项。

定义 $e_2 = x_2 - x_2^*$, 将式(12)代入式(11)可得:

$$\dot{V}_{z1} = -e_1^T A_1 e_1 - \phi(x_1) \|e_1\|^2 + e_1^T (f_1^i + g_1 e_2 + \varepsilon_1 - r_1 - \hat{W}_1^T S_1) \quad i \in M \quad (13)$$

式中, $\tilde{W}_1 = \hat{W}_1 - W_1^*$ 。选取公共 Lyapunov 函数为 $V_1 = V_{z1} + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}_1^T \Gamma_{1w}^{-1} \tilde{W}_1)$ 。其中, $\Gamma_{1w} = \Gamma_{1w}^T > 0$ 为设计矩阵。

带入式(13)并利用 young 不等式, \dot{V}_1 可得:

$$\dot{V}_1 \leq -(\underline{\lambda}_1 + \phi(x_1) - \eta_1 \|f_1^i\|^2/4) e_1^T e_1 + \lambda_{1r} \|e_1\|^2 + \text{tr}(\tilde{W}_1^T \Gamma_{1w}^{-1} \tilde{W}_1) - e_1^T r_1 + \varepsilon_1^2/4\lambda_{1r} + 1/\eta_1 + e_1^T g_1 e_2 \quad (14)$$

式中, $\underline{\lambda}_1 = \lambda_{\min}(A_1)$ 为 A_1 的最小特征值; $\eta_1, \lambda_{1r} > 0$ 为设计常数。

选取 $\phi(x_1)$, \hat{W}_1 及鲁棒项 r_1 如下:

$$\begin{cases} \phi(x_1) \geq \eta_1 \|f_1^i\|^2/4 & i \in M \\ \dot{\hat{W}}_1 = \Gamma_{1w} (S_1 e_1^T - \theta_1^w \hat{W}_1) \\ r_1 = 2\lambda_{1r} e_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\theta_1^w > 0$ 为设计常数。

将式(15)代入式(14)得:

$$\begin{aligned} V_1 \geq & -\underline{\lambda} e_1^T e_1 - \lambda_{1r} \|e_1\|^2 - \frac{\theta_1^w}{2} (\|\tilde{W}_2\| - \|W_1^*\|)^2 + \varepsilon_1^2/4\lambda_{1r} + 1/\eta_1 + e_1^T g_1 e_2 \\ & - \kappa_1 V_1 + V_{10} + e_1^T g_1 e_2 \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\kappa_1 = \min\{2\underline{\lambda}_1, \frac{\theta_1^w}{\lambda_{\max}(\Gamma_{1w}^{-1})}\}$, $\lambda_{\max}(\Gamma_{1w}^{-1})$ 为 Γ_{1w}^{-1} 的最大特征值; $V_{10} = \frac{\theta_1^w}{2} \|W_1^*\|^2 + \varepsilon_1^2/4\lambda_{1r} + 1/\eta_1$; 耦合项 $e_1^T g_1 e_2$ 将在快回路设计中消除。

2) 快回路控制器设计 这一步主要是设计控制力矩 u 使得 x_2 跟踪 x_2^* 。由 $e_2 = x_2 - x_2^*$, 对其求导可得:

$$\dot{e}_2 = f_2^i + g_2^i u + d_2 - \dot{x}_2^* \quad i \in M \quad (17)$$

从式(17)看出, 快回路更具有切换非线性系统的普遍性。令 $V_{z2} = V_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2$, 考虑式(16), 对 V_{z2} 求导并利用 young 不等式可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{z2} \leq & -\kappa_1 V_1 + V_{10} + e_1^T g_1 e_2 + e_2^T (f_2^i + g_2^i u + d_2 - \dot{x}_2^*) \leq \\ & -\kappa_1 V_1 + V_{10} + \eta_2 \|e_2\|^2 (\|e_1^T g_1\|^2 + \|f_2^i\|^2 + \|d_2\|^2 + \|\dot{x}_2^*\|^2) + e_2^T g_2^i u + 1/\eta_2 \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $\eta_2 > 0$ 为设计参数。

选择快回路的控制律 u 为

$$u = -(A_2 e_2 + \eta_2 (\phi(x_2) + \|e_1^T g_1\|^2 + \hat{W}_2^T S_2(\bar{x}_2, \nu_2, \delta_2) + \|\dot{x}_2^*\|^2) e_2 + r_2) / \underline{\lambda} \quad (19)$$

式中, $A_2 > 0$ 为设计矩阵; $\phi(x_2) > 0$ 为将要设计光滑函数; $\hat{W}_2^T S_2(\bar{x}_2, \nu_2, \delta_2)$ 为快回路 RBFNN 的输出; \dot{x}_2^* 为以 x_2^* 为输入文献[12]非线性跟踪微分器的输出; r_2 为快回路鲁棒项。从文献[10]知: $\forall i \in M$, $\exists g_2^i > 0$ 成立, 故一定存在大于零的最大下确界 $\underline{\lambda} = \inf\{\lambda(g_2^i)\}$, $\lambda(\cdot)$ 为相应矩阵的特征值。快回路 RBFNN 符号定义与慢回路 RBFNN 类似, 在此不再累述。

注 1 若按照经典的 backstepping 设计控制器, 由于 x_2^* 的存在使得 u 的表达式会非常复杂, 尽而引起计算膨胀的问题。因此, 引入文献[12]的非线性跟踪微分器进行 x_2^* 估计。

注 2 利用快回路 RBFNN 对外干扰 $\|d_2\|^2$ 进行估计。记 $\|d_2\|^2 = W_2^{*T} S_2(\bar{x}_2, \nu_2, \delta_2) + \varepsilon_2$, ε_2 是其未知的上确界, 即 $\sup|\varepsilon_2| \leq \bar{\varepsilon}_2$ 。

$$\begin{aligned} \text{选择扩张 Lyapunov 函数 } V = V_{z2} + \frac{1}{2} \tilde{W}_2^T \Gamma_{2w}^{-1} \tilde{W}_2. \text{ 其中, } \Gamma_{2w} = \Gamma_{2w}^T > 0 \text{ 为设计矩阵, } \tilde{W}_2 = \hat{W}_2 - W_2^*. \text{ 对 } V \text{ 求导并代入式(18)和式(19)可得:} \\ \dot{V} \leq & -\kappa_1 V_1 + V_{10} - \underline{\lambda}_2 \|e_2\|^2 - \eta_2 (\phi(x_2) + \|f_2^i\|^2) \|e_2\|^2 - e_2^T r_2 + \eta_2 e_2^T e_2 - \eta_2 \hat{W}_2^T S_2 \cdot \\ & \|e_2\|^2 + \eta_2 e_2^T W_2^{*T} S_2 e_2 + \tilde{W}_2^T \Gamma_{2w}^{-1} \dot{\tilde{W}}_2 + \frac{1}{\eta_2} \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $\underline{\lambda}_2 = \lambda_{\min}(A_2)$ 为 A_2 的最小特征值。

选取 $\phi(x_2)$, \hat{W}_2 及鲁棒项 r_2 如下:

$$\begin{cases} \phi(x_2) \geq \|f_2^i\|^2 & i \in M \\ \dot{\hat{W}}_2 = \eta_2 \|e_2\|^2 \Gamma_{2w} S_2 - \Gamma_{2w} \theta_2^w \hat{W}_2 \\ r_2 = 2\eta_2^2 \lambda_{2r} \|e_2\|^2 e_2 \end{cases} \quad (21)$$

式中, $\theta_2^w, \lambda_{2r} > 0$ 为设计常数。

类似慢回路设计过程, 将式(21)代入式(20)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\kappa_1 V_1 + V_{10} - \underline{\lambda}_2 \|e_2\|^2 - \frac{\theta_2^w}{2} (\|\tilde{W}_2\| - \|W_2^*\|)^2 - \\ & \|W_2^*\|^2 + \varepsilon_2^2/4\lambda_{2r} + 1/\eta_2 \end{aligned} \quad (22)$$

根据以上推到可得 NSV 快回路 RBFNN 参数自适应律式(21)和控制律如下:

$$u = u_{nor} + u_{ad} + u_r \quad (23)$$

式中,

$$\begin{cases} u_{nor} = -(A_2 e_2 + \eta_2 (\phi(x_2) + \|g_1^T e_1\|^2 + \|\dot{x}_2^*\|^2) e_2) / \underline{\lambda} \\ u_{ad} = -\hat{W}_2^T S_2(\bar{x}_2, \nu_2, \delta_2) e_2 / \underline{\lambda} \\ u_r = -r_2 / \underline{\lambda} \end{cases}$$

注3 $\phi(\cdot)$ 的选取是构造任意切换信号下慢、快回路光滑控制律的关键。由切换信号 i 属于有限指标集 M 及 f_1^i, f_2^i 均为光滑函数可知, 一定存在着连续映射使得式(15)和式(21)成立。

4 稳定性分析

上面设计的鲁棒自适应控制器可总结为如下:

定理1 对于不确定切换非线性系统式(4)~式(6), 在满足假设1和2条件下, 如果选取虚拟控制器式(12)和控制器式(19), 选取 RBFNN 权值自适应律为式(15)和式(21), 则对于有界的初始条件, 总存在正定矩阵 $A_i > 0$, 和常数 $\theta_i^w, \lambda_{ir} > 0 (i \in \{1, 2\})$, 使得闭环不确定切换非线性系统在任意切换信号下都是半全局稳定的, 同时闭环信号是有界的。

证明 根据式(22)有:

$$\dot{V} \leq -\kappa V + C \quad (24)$$

式中, $\kappa = \min\{\kappa_1, 2\lambda_2, \frac{\theta_2^w}{\lambda_{\max}(\Gamma_{2w}^{-1})}\}$, $C = V_{10} + \frac{\theta_2^w}{2}$,

$$\|W_2^*\|^2 + \varepsilon_2^2/4\lambda_{2r} + 1/\eta_2。$$

式(24)两边同乘 $\exp(\kappa t)$ 有:

$$\frac{d}{dt}(V(t)\exp(\kappa t)) \leq \exp(\kappa t)C \quad (25)$$

对式(25)在 $[0, t]$ 范围积分可得:

$$0 \leq V(t) \leq \frac{C}{\kappa} + [V(0) - \frac{C}{\kappa}]\exp(-\kappa t)$$

因此, 所有闭环切换系统的信号 $e_1, e_2, \tilde{W}_1, \tilde{W}_2$ 是一致渐进有界的, 并且由式(24)可知对于任意给定的设计参数都可以用来调节闭环不确定切换非线性系统的性能。

5 仿真实验

验证所设计的控制器在 NSV 的后掠角从 60° 变化到 75° 时的姿态角跟踪控制效果。假设 NSV 初始状态为: 机翼后掠角为 60° , 飞行高度 $H = 30$ km, 速度 $V = 3000$ m/s, 推力为 210 kN, 初始姿态角和角速率分别为 $\alpha_0 = 1.0^\circ, \beta_0 = 0.5^\circ, \mu_0 = 0.2^\circ, p_0 = q_0 = r_0 = 0$ rad/s, 参考信号为 $\alpha^d = 4^\circ, \beta^d = 0^\circ, \mu^d = 0^\circ$, 且通过指令滤波器 $4/(s+4)$ 的滤波。 $t = 0.1$ s 时刻, NSV 机翼后掠角变形为 75° 。可以采用 2 个模型来表示此过程中 NSV 的飞行特性, $\sigma(t) = 1$ 和 $\sigma(t) = 2$ 分别描述的是机翼后掠角 $60^\circ \sim 67^\circ$ 和 $67^\circ \sim 75^\circ$ 飞行动态。此外, 假设式(2)中加入数值函数的力矩干扰, 即 $d_f^{\sigma(t)} = g_f^{\sigma(t)} \cdot \Delta M(t)$ 。

外干扰在试验的零时刻加入, 其中 $\Delta M(t) = 10^5 [1.5(\sin(t) + 0.3), 2.5 \cdot (\cos(5 \cdot t) + 0.1), \cos(6 \cdot t)]^T$ N·m。

慢、快回路控制器参数: $A_1 = \text{diag}\{1, 1, 1\}$, $\phi_1(x_1) = (\|f_1^1\| + f_1^2)^2, \eta_1 = 1, A_2 = \text{diag}\{2, 2, 2\}$, $\phi_2(x_2) = (\|f_2^1\| + f_2^2)^2, \eta_2 = 1.5$; 快回路 RBF NN 补偿控制器参数选取 $\hat{W}_2(0) = 0_{10 \times 3}, \Gamma_{2v} = 1.5 \cdot I_{10 \times 10}, \theta_2^w = 0.01, \delta_2 = 2\text{rand}(10, 1), v_2 = 2\text{rand}(30, 1) - 1$; 快回路鲁棒项参数 $\lambda_{2r} = 50$ 。得到状态响应曲线及控制输入仿真曲线, 如图2~图4所示。

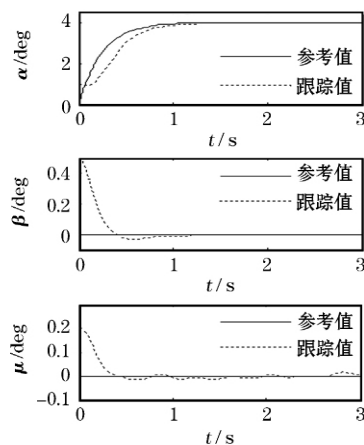


图2 姿态角时间响应曲线

Fig. 2 Time response of attitude angle

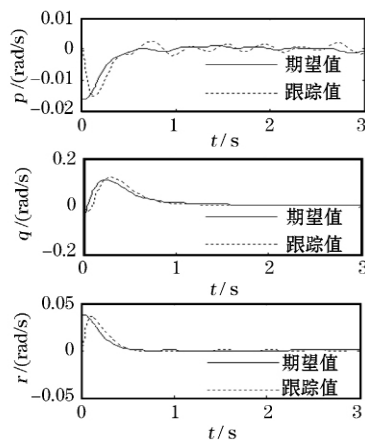


图3 角速率时间响应曲线

Fig. 3 Time response of angular rate

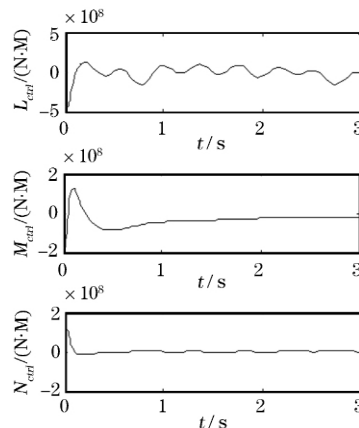


图4 控制力矩响应曲线

Fig. 4 Time response of control torque

从图2中能够看出尽管存在外部干扰,姿态角仍能较好地跟踪指令信号值。

从图3中可以看出虽然角速率跟踪慢回路所设计的角速率期望值 $\omega^* [p^* \ q^* \ r^*]^T$ 有误差,但在所设计的控制器下可以保证跟踪误差非常小。从图4可以看出控制力矩为光滑曲线,满足了飞行模式切换瞬间控制力矩连续性的要求。

6 结 语

针对 NSV 在大包络飞行过程中存在机翼变形以及易受外干扰影响的问题,本文提出了鲁棒自适应 backstepping 控制器设计方法。在控制器设计中,引入 RBFNN 在线估计未知外干扰;通过 young 不等式保证模型切换时控制量的光滑性;采用非线性微分器避免 backstepping 设计中微分膨胀问题;利用鲁棒控制器消除神经网络估计误差的影响。基于公共 Lyapunov 函数,证明了所提出的控制方法可以保证在任意飞行模式切换下 NSV 的姿态角跟踪误差均可以在有限时间内收敛到任意小的有界集内。仿真结果验证了该方法能够很好地实现 NSV 姿态跟踪,且保证了控制力矩的连续性。

参考文献 (References):

- [1] 崔尔杰. 近空间飞行器研究发展现状及关键技术问题[J]. 力学进展 2009 36(6): 658-673. (Cui Er-jie. Research statuses,

development trends and key technical problems of near space flying vehicles[J]. Advances in Mechanics 2009 36(6): 658-673.)

- [2] Young M, Keith S. An overview of advanced concepts for near space systems[C]. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. USA: AIAA 2009.
- [3] Rodriguez A R. Morphing aircraft technology survey [C]. 45th AIAA Aerospace Sciences & Exhibit. USA: AIAA 2007
- [4] 陆宇平,何真. 变体飞行器控制系统综述[J]. 航空学报, 2009 30(10): 1906-1911. (Lu Yu-ping, He Zhen. A survey of morphing aircraft control systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica 2009 30(10): 1906-1911.)
- [5] Branicky M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis and control synthesis for switched and hybrid systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control 1998 43(4): 475-482.
- [6] Ma R C, Zhao J. Backstepping design for global stabilization of switched nonlinear systems in lower triangular form under arbitrary switchings[J]. Automatica 2010 46(11): 1819-1823.
- [7] Wu J L. Stabilizing controllers design for switched nonlinear systems in strict-feedback form[J]. Automatica 2009 45(7): 1092-1096.
- [8] Han T T, Ge S S, Lee T H. Adaptive neural control for a class of switched nonlinear systems[J]. System and Control Letters 2009, 58(4): 109-118.
- [9] Liberzon, D. Switching in systems and control [M]. Boston: Birkhuser 2003.
- [10] 张军,姜长生,方伟. 变结构近空间飞行器大飞行包络控制特性研究[J]. 宇航学报 2009 30(2): 543-549. (Zhang Jun, Jiang Chang-sheng, Fang Wei. Variable structure near space vehicle control characteristics of large flight envelope [J]. Journal of Astronautics 2009 30(2): 543-549.)
- [11] Chen M. Adaptive tracking control of uncertain MIMO nonlinear systems with input constraints [J]. Automatica 2011 47(2): 452-465.
- [12] 韩京清,王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994 14(2): 177-183. (Han Jing-qing, Wang Wei. Nonlinear tracking-differentiator [J]. Journal of System Science and Mathematical Sciences 1994 14(2): 177-183.)

(上接第203页)

6 结 语

本文采用最大距离积法和一种新的目标函数对 K-means 聚类算法进行了改进,能够得到具有良好分散性的初始聚类中心并合理地确定数据样本的类别数。与传统的 K-means 聚类算法的对比,本文中提出的方法能够取得更好的聚类结果,为组合模型建模提供一种方法。

将该方法应用到某石化厂双酚 A 质量指标的在线软测量建模中。仿真结果表明,该方法能较好地跟踪苯酚含量的变化趋势,具有较高的模型精度,显示了它在工业领域的应用潜力。

参考文献 (References):

- [1] 李修亮,苏宏业,褚健. 基于在线聚类的多模型软测量建模方法[J]. 化工学报 2007 58(11): 2835-2839. (Li Xiuliang, Su Hongye, Zhu Jian. Multiple models soft-sensing technique based on online clustering arithmetic [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China) 2007 58(11): 2835-2839.)
- [2] Linlin Liu, Lifang Zhou, Shenggang Xie. A novel supervised multi-model modeling method based on K-means clustering[C]. Control and Decision Conference (CCDC) 2010 Chinese 2010.
- [3] 韩晓红,胡璇. K-means 聚类算法的研究[J]. 电子设计工程, 2009 40(3): 236-239. (Han Xiaohong, Hu Hai. Review of K-means clustering algorithm. Electronic Design Engineering 2009, 40(3): 236-239.)

- [4] 梅振益,杨慧中. 基于混沌差分进化模糊聚类的多模型建模[J]. 计算机与应用化学 2011 28(3): 291-294. (Mei Zhenyi, Yang Huizhong. A multi-model modeling method based on chaotic differential evolution fuzzy clustering [J]. Computers and Applied Chemistry 2011 28(3): 291-294.)
- [5] 熊志阳,陈若田,张玉芳. 一种有效的 K-means 聚类中心初始化方法[J]. 计算机与应用研究, 2011 28(11): 4188-4190. (Xiong Zhongyang, Cheng Ruotian, Zhang Yufang. Effective method for cluster centers' initialization in K-means clustering. Application Research of Computers [J]. 2011 28(11): 4188-4190.)
- [6] 赖玉霞,刘建平. K-means 算法的初始聚类中心的优化[J]. 计算机工程与应用 2008 44(10): 147-149. (Lai Yuxia, Liu Jianping. Optimization study on initial center of K-means algorithm [J]. Computer Engineering and Applications 2008 44(10): 147-149.)
- [7] 张文明,吴江,袁小蛟. 基于密度和最近邻的 K-means 文本聚类算法[J]. 计算机应用 2010 30(7): 1933-1934. (Zhang Wenming, Wu Jiang, Yuan Xiaojiao. K-means text clustering algorithm based on density and nearest neighbor [J]. Journal of Computer Applications 2010 30(7): 1933-1934.)
- [8] HAN Jiawei, MICHELINE K. Data mining concepts and techniques [M]. 2nd ed. Singapore: Elsevier 2006.
- [9] 周立芳,周芦文,赵豫红. 改进 K-means 聚类算法多模型建模的一种新的评价函数[J]. 化工学报 2007 58(8): 2051-2055. (Zhou Lifang, Zhou Luwen, Zhao Yuhong. Multi-modeling of pH neutralization processes using improved K-means clustering based on new validity function [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China) 2007 58(8): 2051-2055.)
- [10] 闪四清,陈茵,程雁等. 数据挖掘-概念、模型、方法和算法 [M]. 清华大学出版社: 北京, 2002. (Shan Siqing, Chen Yin, Cheng Yan. Data mining-concepts, models and algorithms [M]. Tsinghua University Press: Beijing, 2002.)
- [11] 张红荣,张峰. 传统的 K-means 聚类算法的研究与改进[J]. 咸阳师范学院学报 2010 25(4): 59-62. (Zhang Hongrong, Zhang Feng. The Traditional K-means Clustering Algorithm Research and Improvement [J]. Journal of Xianyang Normal University 2010 25(4): 59-62.)