

一类基于模糊系统的非线性鲁棒自适应预测控制

方炜, 姜长生

(南京航空航天大学自动控制工程系, 210016, 南京)

摘要: 基于模糊系统研究了一种新的非线性鲁棒自适应预测控制算法, 并应用于空天飞行器(ASV)再入飞行的姿态控制律设计. 利用模糊系统的一致逼近能力, 逼近被控对象中的未知干扰和不确定性因素, 并基于 Lyapunov 方法设计了鲁棒自适应控制律. 模糊系统的权值无需调整, 仅需根据系统的跟踪误差调节鲁棒自适应控制器中的参数, 在线调整的参数仅为 2 个, 从而大大简化了控制器的设计. 理论分析证明了闭环系统的所有信号一致最终有界. 利用所提控制算法设计了 ASV 高超声速飞行姿态的控制系统, 仿真的系统响应时间为 1.5 s, 且无超调, 这表明该算法对参数不确定性和外界干扰具有较强的鲁棒性.

关键词: 预测控制; 模糊系统; 鲁棒自适应预测; 空天飞行器

中图分类号: TP293.2; V294.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)06-0669-05

Nonlinear Robust Adaptive Predictive Control Based on Fuzzy Systems

FANG Wei, JIANG Changsheng

(Department of Automatic Control Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on a fuzzy system, a novel nonlinear robust adaptive predictive control method is presented and applied to the re-entry of an aerospace vehicle (ASV). The unknown disturbances and uncertainties are estimated using the fuzzy system in virtue of its approaching ability. A robust adaptive controller is designed using the Lyapunov theory. Because the weight parameters of the fuzzy system are kept unchanged, only two parameters of the robust adaptive controller are adaptively adjusted by tracking errors, so as to simplify the design of the controller. It is shown that the closed-loop system is ultimately bounded on all signals. Finally, the flight control system of an aerospace vehicle under hypersonic conditions is designed by the proposed method. The results show that the response time is about 1.5 seconds and the overshoot is 0, respectively, which indicate the fine robust performance of the proposed method for parameter uncertainty and disturbance.

Keywords: predictive control; fuzzy system; robust adaptive prediction; aerospace vehicle

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^[1-2]. 近年来, 非线性预测控制理论得到了进一步的研究和发展^[3-4]. 通常, 预测控制理论^[1,3-4]是建立在非线性系统的精确数学模型基础上的, 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, 甚至会导致控制失效.

目前, 模糊系统已广泛应用于非线性、不确定的系统控制, 如混合模糊式间接、直接自适应控制器^[5]、模糊系统的不确定估计和控制^[6]等. 然而, 模糊系统参数的在线调整需要大量的学习时间, 这使得控制器的设计变得更为复杂, 围绕此类问题展开研究的内容包括基于 T-S 模糊系统的鲁棒自适应控制、利用自适应补偿控制器补偿模糊系统的逼近

误差和权值误差等^[7],但是这些方法仅对单输入-单输出系统给出了理论分析和证明。

针对以上分析,本文结合预测控制方法^[5]和模糊系统理论,提出了一种新的非线性鲁棒自适应预测控制方法,并对空天飞行器(ASV)再入飞行的姿态控制进行了仿真。利用 Lyapunov 理论,设计了基于模糊系统的鲁棒自适应控制律,并证明了闭环系统所有信号一致最终有界、稳定。

1 问题陈述

一类非线性不确定系统的形式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{g}_2(\mathbf{x})\mathbf{d}(x) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} \in R^n$ 、 $\mathbf{u} \in R^p$ 、 $\mathbf{y} \in R^m$ 分别为系统的状态、输入和输出; $\mathbf{d}(x) \in R^n$ 表示未知的建模误差与外界干扰组成的复合干扰; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{g}_1(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{g}_2(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为适当维数的光滑有界函数。

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的相对度 ρ 等同。

依据上述假设的系统滚动优化性能指标为

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

式中: T 为滚动预测时间段; $\mathbf{e}$ 为跟踪误差,即

$$\mathbf{e}(t+\tau) = \mathbf{y}(t+\tau) - \mathbf{y}_c(t+\tau) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{y}(t+\tau)$ 为预测时间段的预测输出, $\mathbf{y}_c(t+\tau)$ 为预测时间段的期望输出。

2 非线性预测控制器

非线性预测控制器^[4]控制矢量 $\mathbf{u}(t)$ 的控制阶数为 ν ,对系统输出进行 $\rho+\nu$ 次求导,则有

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{y}}(t) &= L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ &\vdots \\ \mathbf{y}^{[\rho-1]}(t) &= L_f^{\rho-1} \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{y}^{[\rho]}(t) &= L_f^\rho \mathbf{h}(\mathbf{x}) + L_{g_1} L_f^{\rho-1} \mathbf{h}(\mathbf{x})\mathbf{u} + \\ &\quad L_{g_2} L_f^{\rho-1} \mathbf{h}(\mathbf{x})\mathbf{d} \\ \mathbf{y}^{[\rho+1]}(t) &= L_f^{\rho+1} \mathbf{h}(\mathbf{x}) + l_{11}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{d}) + L_{g_1} L_f^{\rho-1} \dot{\mathbf{u}} \\ &\vdots \\ \mathbf{y}^{[\rho+\nu]}(t) &= L_f^{\rho+\nu} \mathbf{h}(\mathbf{x}) + l_{v1}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{d}) + \\ &\quad l_{v2}(\dot{\mathbf{u}}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{d}) + \cdots + \\ &\quad l_{vv}(\mathbf{u}^{[\nu-1]}, \cdots, \mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{d}) + \\ &\quad L_{g_1} L_f^{\rho-1} \mathbf{h}(\mathbf{x})\mathbf{u}^{[\nu]} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $l_{11}, l_{21}, l_{22}, \cdots, l_{v1}, \cdots, l_{vv}$ 是关于 $\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \cdots, \mathbf{u}^{[\nu-1]}$

和 $\mathbf{d}$ 的复杂非线性函数。由于干扰 $\mathbf{d}$ 是未知量,所以假设 $\dot{\mathbf{d}}, \cdots, \mathbf{d}^{[\nu]} = 0$ 。

在滚动预测时域内,任意时刻 τ 的 $\mathbf{y}(t+\tau)$ 和 $\mathbf{y}_c(t+\tau)$ 可以根据泰勒级数展开,对性能指标式(2)求最优,可以推导出具有闭合解析形式的预测控制律

$$\mathbf{u}(t) = -(\mathbf{G}(\mathbf{x}))^{-1}(\mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{K}\mathbf{M}_\rho - \mathbf{y}_c^{[\rho]}(t) + \mathbf{w}) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = L_f^\rho \mathbf{h}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = L_{g_1} L_f^{\rho-1} \mathbf{h}(\mathbf{x})$ 非奇异且范数有界;复合干扰 $\mathbf{w} = L_{g_2} L_f^{\rho-1} \mathbf{h}(\mathbf{x})\mathbf{d}$; $\mathbf{M}_\rho$ 和 $\mathbf{K}$ 的定义见参考文献[4]。

3 基于模糊系统的非线性鲁棒自适应预测控制律

对于控制器来说, $\mathbf{w}$ 是未知量,因此鲁棒自适应控制器是不可实现的。虽然预测控制在滚动优化的控制策略下具有一定的鲁棒性,然而对于难以准确建模且运行环境恶劣的实际系统,干扰的大小也难以估计,随着 $\mathbf{w}$ 的增大,预测控制的性能将不断下降直至控制失效。因此,必须引入新的控制策略,具体方案如图 1 所示。此时,则有

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_f + \mathbf{u}_{ad} \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_p = -(\mathbf{G}(\mathbf{x}))^{-1}(\mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{K}\mathbf{M}_\rho - \mathbf{y}_c^{[\rho]}(t)) \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_f = -(\mathbf{G}(\mathbf{x}))^{-1} \mathbf{v}_f \quad (8)$$

$$\mathbf{u}_{ad} = -(\mathbf{G}(\mathbf{x}))^{-1} \mathbf{v}_{ad} \quad (9)$$

式(6)~式(9)中: $\mathbf{u}_p$ 为预测控制器; $\mathbf{v}_f$ 为逼近 $\mathbf{w}$ 的模糊系统输出; $\mathbf{v}_{ad}$ 为鲁棒自适应控制器。

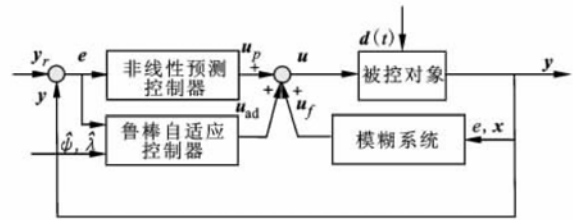


图1 模糊系统下的非线性鲁棒自适应预测控制结构

3.1 模糊系统逼近理论

模糊控制器采用 IF-THEN 模糊规则,且运用了单点模糊化、乘积推理、重心法去模糊化。设 w_χ 为 $\mathbf{w}$ 的第 χ 个元素, $\chi=1, \cdots, m$, 构造逼近 w_χ 的模糊系统的第 i 条模糊规则为

If x_1 is $A_{\chi 1}^i$, and x_2 is $A_{\chi 2}^i$, and, $\cdots$, and x_n is $A_{\chi n}^i$

then y_χ is $\theta_\chi^i, i=1, \cdots, L_\chi; \chi=1, \cdots, m$

其中 L_χ 为模糊系统的规则数,则模糊系统的输出为

$$\left. \begin{aligned} \hat{w}_\chi(x|\theta_\chi) &= \sum_{i=1}^{L_\chi} \theta_\chi^i \xi_\chi^i(x) = \xi_\chi^T(x) \theta_\chi \\ \theta_\chi &= [\theta_1, \dots, \theta_{L_\chi}]^T \\ \xi_\chi(x) &= [\xi_\chi^1(x), \dots, \xi_\chi^{L_\chi}(x)]^T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中

$$\xi_\chi^i(x) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{a_j^i}^i(x_j)}{\sum_{i=1}^{L_\chi} \left(\prod_{j=1}^n \mu_{a_j^i}^i(x_j) \right)} \quad (11)$$

其中 $\xi_\chi^i(x)$ 称为模糊基函数, $\mu_{a_j^i}^i(x_j)$ 为隶属函数. 因此, 有

$$\left. \begin{aligned} \hat{w}(x|\theta) &= \xi^T(x) \theta \\ \theta &= [\theta_1^T, \dots, \theta_m^T]^T \\ \xi(x) &= \text{diag}(\xi_1(x), \dots, \xi_m(x)) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

假设 4^[5] 对于任意的 $x \in \Omega_x$, 其中 Ω_x 为一紧集, 则模糊系统的最优权值向量为

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in M_\theta} [\sup_{x \in M_x} |w - \hat{w}(x|\theta)|] \quad (13)$$

且最优权值向量的所在凸区域为

$$M_\theta = \{\theta | \|\theta\| \leq M_0\} \quad (14)$$

其中常数 $M_0 > 0$.

由此, 复合干扰为

$$w = \hat{w}(x|\theta^*) + \varepsilon \quad (15)$$

模糊系统的逼近误差为 $\varepsilon^T = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]$, 逼近误差的上界为 $\bar{\varepsilon}$, $\|\varepsilon\| \leq \bar{\varepsilon}$, 不妨令 $\bar{\varepsilon} \leq \psi$.

3.2 鲁棒自适应控制器设计

将式(6)代入式(4)中的 $y^{[p]}(t)$, 经过一系列的变换可得误差方程

$$\begin{aligned} \dot{\hat{e}} &= A\hat{e} + B(w - v_f - v_{ad}) = A\hat{e} + \\ &B(\hat{w}(x|\theta^*) - \hat{w}(x|\theta) + \varepsilon - v_{ad}) \end{aligned} \quad (16)$$

式中

$$\hat{e} = [\hat{e}_1, \dots, \hat{e}_m]^T \in R^{mp}$$

$$\hat{e}_i = [e_i \dots e_i^{p-1}]^T$$

$$A = \text{diag}(A_1, \dots, A_m) \in R^{mp \times mp}$$

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

其中

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_{i,0} & -k_{i,1} & -k_{i,2} & \dots & -k_{i,p-1} \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

且 $k_{i,j}$ 为矩阵 K 的第 i 行元素, $i=1, \dots, m$, $k_{i,j}$ 的取值由预测时域 T 、相对阶 ρ 以及控制阶 ν 来决定.

根据文献[4]选择合适的参数, 使得

$$h(e) = e_t^{[p]}(t) + k_{i,\rho-1} e_t^{[\rho-1]}(t) + \dots + k_{i,0} \quad (17)$$

为 Hurwitz 多项式.

定义模糊系统的权值误差为

$$A_\theta = \theta^* - \theta \quad (18)$$

且令 $c_\theta = \|A_\theta\| = (\text{tr}(A_\theta^T A_\theta))^{1/2}$, $A_\theta^m = A_\theta c_\theta$, 则有

$$\|A_\theta^m\| \leq 1 \quad (19)$$

那么, 式(16)可改写为

$$\dot{\hat{e}} = A\hat{e} + c_\theta B \xi^T(x) A_\theta^m + B(\varepsilon - v_{ad}) \quad (20)$$

令 $\lambda = c_\theta^2/2$, 则鲁棒自适应控制器

$$v_{ad} = \hat{\lambda} \|\xi(x)\|^2 s + \hat{\psi} \tanh(\hat{\psi} s / \delta) \quad (21)$$

式中: $\hat{\lambda}$ 和 $\hat{\psi}$ 分别为 λ 和 ψ 的估计值; δ 为设计参数; $s = B^T P \hat{e}$, $P = \text{diag}(P_1, \dots, P_m) \in R^{mp \times mp}$, P_i 满足

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

且 P_i, Q_i 均为正定对称矩阵.

3.3 稳定性分析

引理 1^[8] 对于任意的 $c > 0$ 和 $z \in R$, 有

$$0 < \|z\| - z \tanh(z/c) \leq \zeta c \quad (23)$$

式中: ζ 是满足 $\zeta = e^{-(\zeta+1)}$ 的常数, 即 $\zeta = 0.2785$.

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 ν , 取形如式(6)的控制律, 在参数自适应律的作用下, 闭环系统所有信号一致最终有界. 参数自适应律为

$$\dot{\hat{\lambda}} = \Gamma_\lambda (\|\xi(x)\|^2 s^T s - \sigma_\lambda (\hat{\lambda} - \lambda_0)) \quad (24)$$

$$\dot{\hat{\psi}} = \Gamma_\psi (\|s\| - \sigma_\psi (\hat{\psi} - \psi_0)) \quad (25)$$

式中: $\Gamma_\lambda, \Gamma_\psi$ 和 $\sigma_\lambda, \sigma_\psi$ 为控制器设计参数; λ_0, ψ_0 为 $\hat{\lambda}, \hat{\psi}$ 的初值. 对于给定的 $\tau > \left(\frac{2c_2}{\lambda_{\max}(P)c_1} \right)^{1/2}$, 其中

$$c_1 = \min(\lambda_{\min}(Q)/\lambda_{\max}(P), \Gamma_\lambda \sigma_\lambda, \Gamma_\psi \sigma_\psi) \quad (26)$$

$$c_2 = \frac{1}{2} \sigma_\lambda (\lambda - \lambda_0)^2 + \frac{1}{2} \sigma_\psi (\psi - \psi_0)^2 + \frac{1}{2} + \zeta \delta \quad (27)$$

$Q = \text{diag}(Q_1, \dots, Q_m)$ 为给定的对称正定矩阵, 则存在时间 $T > 0$, 使得当 $t \geq t_0 + T$ 时, $\|\hat{e}\| \leq \tau$.

证明 构造如下 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \hat{e}^T P \hat{e} + \frac{1}{2\Gamma_\lambda} \tilde{\lambda}^2 + \frac{1}{2\Gamma_\psi} \tilde{\psi}^2 \quad (28)$$

式中: $\tilde{\lambda} = \lambda - \hat{\lambda}$; $\tilde{\psi} = \psi - \hat{\psi}$. 将 V 沿着系统的轨迹求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} \hat{e}^T (PA + A^T P) \hat{e} + c_\theta \hat{e}^T PB \xi^T(x) A_\theta^m + \\ &\hat{e}^T PB(\varepsilon - v_{ad}) - \Gamma_\lambda^{-1} \tilde{\lambda} \dot{\tilde{\lambda}} - \Gamma_\psi^{-1} \tilde{\psi} \dot{\tilde{\psi}} \end{aligned} \quad (29)$$

根据式(22),可将式(29)写成

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\hat{\mathbf{e}}\|^2 + c_\theta \mathbf{s}^T \xi^T(\mathbf{x}) \mathbf{A}_\theta^m + \mathbf{s}^T (\mathbf{e} - \mathbf{v}_{\text{ad}}) - \Gamma_\lambda^{-1} \dot{\tilde{\lambda}} - \Gamma_\psi^{-1} \dot{\tilde{\psi}} \quad (30)$$

考虑如下不等式成立

$$c_\theta \mathbf{s}^T \xi^T(\mathbf{x}) \mathbf{A}_\theta^m \leq \frac{c_\theta^2}{2} \mathbf{s}^T \xi^T(\mathbf{x}) \xi(\mathbf{x}) \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{A}_\theta^{mT} \mathbf{A}_\theta^m \leq \lambda \|\xi(\mathbf{x})\|^2 \mathbf{s}^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} \quad (31)$$

则式(29)中的相关项可以表示为

$$-\mathbf{s}^T \mathbf{v}_{\text{ad}} = -\hat{\lambda} \|\xi(\mathbf{x})\|^2 \mathbf{s}^T \mathbf{s} - \hat{\psi} \mathbf{s}^T \tanh(\hat{\psi} \mathbf{s} / \delta) \quad (32)$$

将式(31)、式(32)代入式(30),可得

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\hat{\mathbf{e}}\|^2 + \lambda \|\xi(\mathbf{x})\|^2 \mathbf{s}^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} + \|\mathbf{s}\| \hat{\psi} - \hat{\lambda} \|\xi(\mathbf{x})\|^2 \mathbf{s}^T \mathbf{s} - \hat{\psi} \mathbf{s}^T \tanh(\hat{\psi} \mathbf{s} / \delta) - \Gamma_\lambda^{-1} \dot{\tilde{\lambda}} - \Gamma_\psi^{-1} \dot{\tilde{\psi}}$$

根据引理1,有

$$-\hat{\psi} \mathbf{s}^T \tanh(\hat{\psi} \mathbf{s} / \delta) \leq -\hat{\psi} \|\mathbf{s}\| + \zeta \delta \quad (33)$$

因此

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\hat{\mathbf{e}}\|^2 - \tilde{\lambda} (\Gamma_\lambda^{-1} \dot{\tilde{\lambda}} - \|\xi(\mathbf{x})\|^2 \mathbf{s}^T \mathbf{s}) - \tilde{\psi} (\Gamma_\psi^{-1} \dot{\tilde{\psi}} - \|\mathbf{s}\|) + \frac{1}{2} + \zeta \delta \quad (34)$$

将式(24)、式(25)代入式(34),则式(34)可改写为

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\hat{\mathbf{e}}\|^2 + \sigma_\lambda \tilde{\lambda} (\hat{\lambda} - \lambda_0) + \sigma_\psi \tilde{\psi} (\hat{\psi} - \psi_0) + \frac{1}{2} + \zeta \delta \quad (35)$$

考虑到

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda} (\hat{\lambda} - \lambda_0) &= \tilde{\lambda} (\lambda - \lambda_0) - \tilde{\lambda}^2 \leq -\frac{1}{2} \tilde{\lambda}^2 + \frac{1}{2} (\lambda - \lambda_0)^2 \\ \tilde{\psi} (\hat{\psi} - \psi_0) &\leq -\frac{1}{2} \tilde{\psi}^2 + \frac{1}{2} (\psi - \psi_0)^2 \end{aligned} \quad (36)$$

则有

$$\dot{V} \leq -c_1 V + c_2 \quad (37)$$

对式(37)积分,可得

$$V(t) \leq \frac{c_2}{c_1} + \left(V(t_0) - \frac{c_2}{c_1} \right) e^{-c_1(t-t_0)} \quad (38)$$

因此,闭环系统所有信号一致最终有界,对于任意给定的 $\tau > \left(2c_2 / (\lambda_{\max}(\mathbf{P})c_1) \right)^{1/2}$, 存在时间 $T > 0$, 使得对所有的 $t = t_0 + T$, 有 $\|\mathbf{e}\| \leq \tau$, 证毕。

4 仿真研究

4.1 仿真模型

本文的 ASV 高超声速飞行仿真模型来自参考文献[9]。考虑 ASV 做高超声速再入飞行,主发动机推力应设为 0。由于 ASV 受气动参数的摄动以及外界干扰,所以 ASV 的姿态运动方程存在不确定项。控制器的设计目标是:根据本文提出的算法,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,使得 ASV 的姿态角快速跟踪期望姿态角的指令信号。

4.2 控制器设计

4.2.1 外回路控制器设计 外回路的相对阶 $\rho = 1$, 选择控制阶 $\nu = 0$, 预测时间段 $T = 0.7$ s。根据需要, $\mathbf{x}_s$ 的每个变量采用 5 个模糊语言变量: A_j^1 (负大)、 A_j^2 (负小)、 A_j^3 (零)、 A_j^4 (正小)、 A_j^5 (正大), 其对应的隶属函数为

$$\mu_{A_j^i}(x_j) = e^{-(x_j - \pi_j)^2} \quad (39)$$

式中: $i = 1, \dots, 5$; $\mu_j = -0.4, -0.2, 0.0, 0.2, 0.4$ 。这里, 分别使用 25 条模糊规则来逼近复合干扰 $\mathbf{w}$ 中的各个元素, 其他参数分别为 $\mathbf{Q}_1 = 5\mathbf{I}_{3 \times 3}$, $\Gamma_{\lambda_1} = \Gamma_{\psi_1} = 10$, $\sigma_{\lambda_1} = \sigma_{\psi_1} = 0.5$, $\lambda_{1_0} = \psi_{1_0} = 0.1$, $\delta_1 = 0.01$ 。

4.2.2 内回路控制器设计 内回路控制器设计和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 $\nu = 0$, 预测时间段 $T = 0.3$ s, 其他参数分别为 $\mathbf{Q}_2 = 15\mathbf{I}_{3 \times 3}$, $\Gamma_{\lambda_2} = \Gamma_{\psi_2} = 20$, $\sigma_{\lambda_2} = 0.01$, $\sigma_{\psi_2} = 0.1$, $\lambda_{2_0} = \psi_{2_0} = 0.15$, $\delta_2 = 0.01$ 。

4.3 仿真结果

ASV 飞行速度为 2 km/s, 飞行高度为 25 km, 姿态初始值为 $\alpha_0 = 3^\circ$, $\beta_0 = 1^\circ$, $\mu_0 = 4^\circ$, 滚转角速率 p 、俯仰角速率 q 和偏航角速率 r 的初始值均为 0, 姿态指令信号为 $\alpha_c = 2^\circ$, $\beta_c = 0^\circ$, $\mu_c = 1^\circ$, 左、右副翼 δ_a 、 δ_e 以及方向舵 δ_r 的限幅范围为 $\pm 30^\circ$ 。假设 ASV 的阻力气动参数 C_D 有 30% 是不确定的, 升力气动参数 C_L 有 10% 是不确定的, 并且 ASV 的内回路存在不确定力矩 ($4 \times 10^4 \sin(t)$, $3 \times 10^4 \sin(t)$, $5 \times 10^4 \sin(t)$), 则仿真结果如图 2~图 4 所示。

图 2 是根据参考文献[6]设计的姿态控制器的效果图, 当 ASV 存在不确定参数和外界干扰的情况下, 可以看出非线性预测控制的性能不够理想。图 3 是根据本文方法设计的 ASV 姿态控制器的控制效果图, 从中可以看出, 外界干扰和系统不确定组成的复合干扰受到了抑制, 整个闭环系统具有较好的控制精度和鲁棒性。图 4 为 ASV 内外回路的自适应

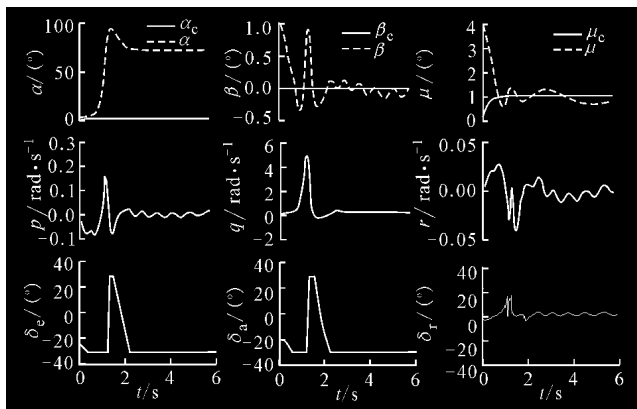


图2 不确定条件下非线性最优预测控制的性能

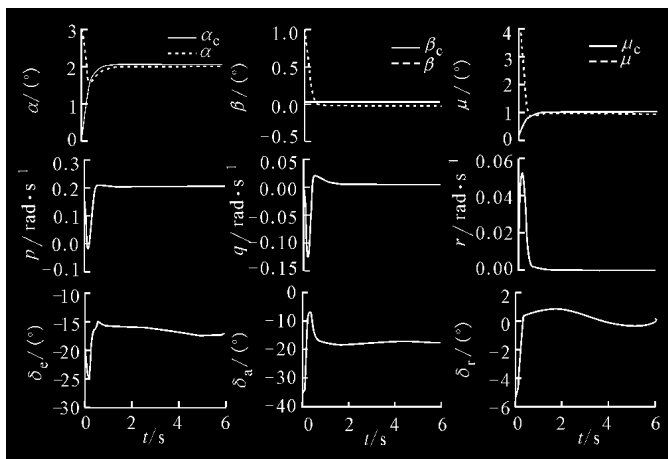
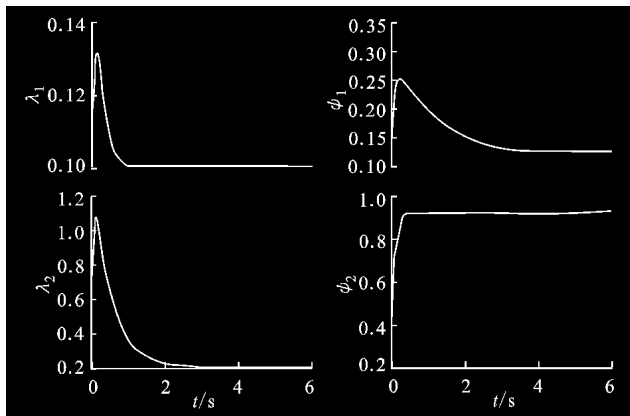


图3 自适应鲁棒模糊预测控制的性能

图4 λ 和 ϕ 估计值的响应曲线

参数 $\hat{\lambda}$ 和 $\hat{\phi}$ 的响应曲线。

5 结 论

研究表明,在外界未知干扰和不确定因素的影响下,非线性预测控制算法的控制性能将明显降低,不能满足 ASV 对控制精度和鲁棒性的要求。本文结合非线性预测控制与模糊系统理论,设计了一种新的鲁棒自适应预测控制算法,仅需在线调整 2 个参数,极大地减轻了控制器的计算负担,也便于工程实现与调试。在系统存在不确定因素和外界干扰的情况下,基于模糊系统设计的控制器可保证整个闭

环系统一致最终有界、稳定,同时仿真结果表明本文的控制方案是有效的。

参考文献:

- [1] FEN W. LMI-based robust model predictive control and its application to an industrial CSTR problem [J]. Journal of Process Control, 2001, 11(3): 649-659.
- [2] LEYLA O, MAYURESH V K. Stability analysis of a multi-model predictive control algorithm with application to control of chemical reactors [J]. Journal of Process Control, 2006, 16(5): 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]//43rd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 1848-1853.
- [4] CHEN Wenhua, DONALD J B, PETER J G. Optimal control of nonlinear systems: a predictive control approach [J]. Automatic, 2003, 39(6): 633-641.
- [5] CHI H W, TSUNG C L, TSU T L, et al. Adaptive hybrid intelligent control for uncertain nonlinear dynamical systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2002, 32(5): 583-597.
- [6] 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 Yinhe, LI Zhiyuan. Adaptive tracking control for a class of nonlinear systems based on fuzzy logic systems [J]. Control and Decision, 2004, 19(10): 1121-1124.
- [7] DANIEL V D, YU Tang. Adaptive robust fuzzy control of nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2004, 34(3): 1596-1601.
- [8] 杨盐生. 不确定系统的鲁棒控制及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 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 Liang, JIANG Changsheng, CHEN Haitong, et al. Direct adaptive trajectory linearization control of aerospace vehicle using SHLNN [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 338-344.

(编辑 苗凌)