

一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模控制

周 丽, 姜长生, 都延丽

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对不确定严格反馈块控非线性系统, 提出了一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模变结构控制方法. 系统的未知不确定及外界干扰由模糊系统在线逼近, 利用反步法设计了变结构控制的终端滑模面, 并由此得到了鲁棒自适应终端滑模控制器, 使系统的跟踪误差在有限时间内趋于给定轨迹的任意小的邻域内. 通过Lyapunov定理证明了闭环系统所有信号最终有界. 对某战斗机6自由度机动仿真结果表明, 该方法具有强鲁棒性.

关键词: 鲁棒自适应控制; 反步法; 终端滑模; 模糊系统; 机动飞行

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A robust and adaptive terminal sliding mode control based on backstepping

ZHOU Li, JIANG Chang-sheng, DU Yan-li

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: A robust and adaptive terminal sliding mode control based on backstepping is presented for a general class of strict-block-feedback systems with uncertainties. Fuzzy logic systems are employed to compensate for the unknown uncertainties in the system. Adaptive backstepping method is then used to design the terminal sliding surface. A robust and adaptive variable-structure controller is thus obtained. The tracking error is driven onto the sliding surface and converges to an arbitrary small neighborhood of the desired trajectory in finite-time. Using the Lyapunov approach, we prove that all signals in the closed loop system are ultimately bounded. Finally, the simulation results of the nonlinear six-degree-of-freedom maneuver flight of a fighter plane demonstrate that the proposed approach has strong robust performance.

Key words: robust and adaptive control; backstepping; terminal sliding mode; fuzzy logic system; maneuver flight

1 引言(Introduction)

滑模变结构控制具有控制精度高、结构简单等优点, 而且由于滑动模态的存在, 使得它对外界干扰和参数摄动具有强鲁棒性. 为了进一步提高滑模控制器的性能, 文献[1]提出了基于非线性滑模面的终端滑模控制, 使系统的跟踪误差在有限时间内收敛, 获得了比传统滑模更快的响应速度; 文献[2]为柔性机械手设计了终端滑模控制器, 获得了较好的效果. 然而传统的滑模变结构控制要求系统的不确定满足匹配条件, 而实际系统, 如电机、飞行器等模型中的不确定往往是非匹配的, 而且模型是高阶的, 给控制器的设计带来了困难; 为此, 文献[3]提出了自适应模糊终端滑模控制, 解决了时变非匹配干扰的线性多输入多输出(MIMO)系统控制器设计问题; 文献[4]研究了非线性不确定MIMO系统的高阶滑模控制, 但不确定需满足匹配条件.

本文针对不确定严格反馈块控非线性系统提出了一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模控制方法. 首先利用基于模糊系统的自适应反步法设计了使前 $n - 1$ 个子系统稳定的虚拟控制律, 在第 n 步, 基于自适应反步法的结果设计了变结构控制的终端滑模面, 得到了具有全局快速有限时间收敛的自适应终端滑模控制器. 对某战斗机的协调转弯机动仿真表明, 该方法具有强鲁棒性.

2 问题描述(Problem description)

考虑如下MIMO不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_i = \boldsymbol{f}_i(\boldsymbol{x}_i) + G_i(\boldsymbol{x}_i)\boldsymbol{x}_{i+1} + \boldsymbol{\psi}_i, \\ \quad \quad \quad i = 1, \dots, n - 1, \\ \dot{\boldsymbol{x}}_n = \boldsymbol{f}_n(\boldsymbol{x}_n) + G_n(\boldsymbol{x}_n)\boldsymbol{u} + \boldsymbol{\psi}_n, \\ \boldsymbol{y} = \boldsymbol{x}_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\boldsymbol{x}_i \in \mathbb{R}^\rho$, ρ 为子系统的维数; $\boldsymbol{x}_i^T = [x_{i1}^T, \dots,$

$\mathbf{x}_i^T]$, $i = 1, \dots, n$ 为状态向量; $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$ 为控制输入, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ 为输出; $\mathbf{f}_i(\bar{\mathbf{x}}_i)$, $G_i(\bar{\mathbf{x}}_i)$ 为已知函数, $\boldsymbol{\psi}_i$ 为由不确定和未知外界干扰构成的复合干扰, 表示为如下形式:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_i = \Delta \mathbf{f}_i(\bar{\mathbf{x}}_i) + \Delta G_i(\bar{\mathbf{x}}_i) \mathbf{x}_{i+1} + \mathbf{d}_i, \\ \boldsymbol{\psi}_n = \Delta \mathbf{f}_i(\bar{\mathbf{x}}_i) + \Delta G_i(\bar{\mathbf{x}}_i) \mathbf{u} + \mathbf{d}_n. \end{cases} \quad (2)$$

其中: \mathbf{d}_i 为未知外界干扰, 有界. 控制系统目标是消除复合干扰对系统的影响, 稳定跟踪给定的输入参考信号 $\mathbf{y}_r(t)$, $t \geq 0$.

利用模糊系统的逼近特性, $\boldsymbol{\psi}_i$ 可以表示为

$$\boldsymbol{\psi}_i = \boldsymbol{\theta}^{*T} \boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon},$$

其中: $\boldsymbol{\theta}^*$ 为理想权值矩阵, $\boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x})$ 为模糊隶属函数, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为逼近误差.

3 控制器设计及稳定性分析 (Controller design and stability analysis)

3.1 控制器设计 (Controller design)

假设 1 矩阵 G_i 非奇异, 即存在常数 $g_{i1} \geq g_{i0} > 0$, 使得 $g_{i0} \leq \|G_i\| \leq g_{i1}$.

假设 2 模糊系统理想权值 $\boldsymbol{\theta}_i^*$ 有界.

遍及本文, 定义 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i$ 为权值估计值, $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i = \hat{\boldsymbol{\theta}}_i - \boldsymbol{\theta}_i^*$ 为估计误差. k_i, c_i, δ_i 为系统设计参数. Λ_i 为正定阵.

Step 1 考虑闭环系统(1)的第1个子系统:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}_1 + G_1 \mathbf{x}_2 + \boldsymbol{\psi}_1.$$

定义误差向量 $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{y}_r$, 对其求导, 并由模糊系统对 $\boldsymbol{\psi}_1$ 逼近得

$$\dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{f}_1 + G_1 \mathbf{x}_2 + \boldsymbol{\theta}_1^{*T} \boldsymbol{\zeta}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_1 - \dot{\mathbf{y}}_r. \quad (3)$$

根据上式设计如下虚拟控制律及自适应律:

$$\mathbf{v}_1 = G_1^{-1}(-k_1 \mathbf{e}_1 - \mathbf{f}_1 - \hat{\boldsymbol{\theta}}_1^T \boldsymbol{\zeta}_1 + \dot{\mathbf{y}}_r), \quad (4)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_1 = \Lambda_1(\boldsymbol{\zeta}_1 \mathbf{e}_1^T - \delta_1 \hat{\boldsymbol{\theta}}_1). \quad (5)$$

为了避免下一步设计中对虚拟控制律求导, 使用一阶低通滤波器对虚拟控制律进行滤波, 以降低控制器复杂性^[5], 滤波器动态方程如下:

$$\tau_1 \dot{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{z}_1 = \mathbf{v}_1, \quad \mathbf{z}_1(0) = \mathbf{v}_1(0). \quad (6)$$

其中: τ_1 为滤波器时间常数, \mathbf{z}_1 为 \mathbf{v}_1 的估计值.

定义第一个子系统的边界层误差为

$$\mathbf{b}_1 = \mathbf{z}_1 - \mathbf{v}_1. \quad (7)$$

Step i 考虑闭环系统(1)的第 i 个子系统:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}_i + G_i \mathbf{x}_{i+1} + \boldsymbol{\psi}_i, \quad 2 \leq i \leq n-1.$$

定义误差向量 $\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{z}_{i-1}$, 对其求导得

$$\dot{\mathbf{e}}_i = \mathbf{f}_i + G_i \mathbf{x}_{i+1} + \boldsymbol{\theta}_i^{*T} \boldsymbol{\zeta}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_i - \dot{\mathbf{z}}_{i-1}. \quad (8)$$

根据上式, 设计如下虚拟控制律及自适应律:

$$\mathbf{v}_i = G_i^{-1}(-k_i \mathbf{e}_i - \mathbf{f}_i - \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^T \boldsymbol{\zeta}_i +$$

$$G_{i-1}^T \mathbf{e}_{i-1} + \dot{\mathbf{z}}_{i-1}), \quad (9)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_i = \Lambda_i(\boldsymbol{\zeta}_i \mathbf{e}_i^T - \delta_i \hat{\boldsymbol{\theta}}_i). \quad (10)$$

对 \mathbf{v}_i 进行滤波, 得到估计值 \mathbf{z}_i .

反步迭代设计到此为止, 最后一步设计终端滑模控制器使跟踪误差在有限时间内收敛.

Step n 考虑闭环系统(1)的第 n 个子系统:

$$\dot{\mathbf{x}}_n = \mathbf{f}_n + G_n \mathbf{u} + \boldsymbol{\psi}_n.$$

令 $\mathbf{e}_n = \mathbf{x}_n - \mathbf{z}_{n-1}$, 定义终端滑模面

$$\dot{S} = AS + \Gamma S^{\rho_1/\rho_2}. \quad (11)$$

其中: $S = \sum_{i=1}^{n-1} c_i \mathbf{e}_i + \mathbf{e}_n$, 矩阵 A, Γ 为负定阵, ρ_1, ρ_2 均为正奇数且 $\rho_1 < \rho_2$, 对 S 求导得

$$\sum_{i=1}^{n-1} c_i \dot{\mathbf{e}}_i + \dot{\mathbf{e}}_n - AS - \Gamma S^{\rho_1/\rho_2} = 0. \quad (12)$$

将虚拟控制律代入式(3)及式(8)得

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_1 = -k_1 \mathbf{e}_1 - \tilde{\boldsymbol{\theta}}_1^T \boldsymbol{\zeta}_1 + G_1 \mathbf{e}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_1 + G_1 \mathbf{b}_1, \\ \dot{\mathbf{e}}_i = -k_i \mathbf{e}_i - \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^T \boldsymbol{\zeta}_i + G_i \mathbf{e}_{i+1} - \\ \quad G_{i-1}^T \mathbf{e}_{i-1} + \boldsymbol{\varepsilon}_i + G_i \mathbf{b}_i. \end{cases} \quad (13)$$

将上式代入式(12)可得

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{n-1} c_i (-k_i \mathbf{e}_i - \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^T \boldsymbol{\zeta}_i + G_i \mathbf{e}_{i+1} + \boldsymbol{\varepsilon}_i + G_i \mathbf{b}_i) - \\ & \sum_{i=2}^{n-1} G_{i-1}^T \mathbf{e}_{i-1} + \mathbf{f}_n + G_n \mathbf{u} + \boldsymbol{\psi}_n - \dot{\mathbf{z}}_{n-1} - \\ & AS - \Gamma S^{\rho_1/\rho_2} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

上式中 $\sum_{i=1}^{n-1} c_i (-\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^T \boldsymbol{\zeta}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_i) + \boldsymbol{\psi}_n$ 为未知函数, 用模糊系统逼近之, 则控制输入可设计为

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = & -G_n^{-1} \sum_{i=1}^{n-1} c_i (-k_i \mathbf{e}_i + G_i \mathbf{e}_{i+1} + G_i \mathbf{b}_i) - \\ & G_n^{-1} (\mathbf{f}_n + \hat{\boldsymbol{\theta}}_n^T \boldsymbol{\zeta}_n - \dot{\mathbf{z}}_{n-1} - AS - \\ & \Gamma S^{\rho_1/\rho_2}) + G_n^{-1} \sum_{i=2}^{n-1} G_{i-1}^T \mathbf{e}_{i-1}. \end{aligned} \quad (15)$$

参数自适应律设计如下:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_n = \Lambda_n (\boldsymbol{\zeta}_n S_n^T - \delta_n \hat{\boldsymbol{\theta}}_n). \quad (16)$$

3.2 稳定性分析 (Stability analysis)

为了便于稳定性分析, 首先给出如下引理:

引理 1 设 $D \subset \mathbb{R}^n$ 是包含原点的定义域, 假设存在一个连续可微的正定函数 $L(t, \mathbf{x})$, 对于 $(t, \mathbf{x}) \in [0, \infty) \times D$ 满足如下条件:

$$W_1(\mathbf{x}) \leq L(t, \mathbf{x}) \leq W_2(\mathbf{x}), \quad (17)$$

$$\dot{L}(t, \mathbf{x}) \leq -\mu W_3(\mathbf{x}) + \phi. \quad (18)$$

其中: ϕ 为正实数, $\forall t \geq 0, \forall \mathbf{x} \in D, W_1(\mathbf{x}), W_2(\mathbf{x}), W_3(\mathbf{x})$ 都是 D 上的连续正定函数, 且存在大于零的

常数 c ,使得 $\Xi = \{W_1(\mathbf{x}) \leq c \text{ 和 } W_2(\mathbf{x}) < c\}$ 是 D 的一个紧子集,则函数 $L(t, \mathbf{x})$ 将在有限时间内收敛到有界紧集内.

证 设 $\kappa > 0$ 是紧集 Ξ 上 $W_3(\mathbf{x})$ 的极小值,即 $\kappa = \min_{\mathbf{x} \in \Xi} W_3(\mathbf{x}) > 0$,则 $\forall \mathbf{x} \in \Xi, \forall \phi \leq \mu\kappa/2$,

$$\begin{aligned} \dot{L}(t, \mathbf{x}) &\leq -\mu W_3(\mathbf{x})/2 - \mu\kappa/2 + \phi \leq \\ &-\mu W_3(\mathbf{x})/2 \leq -\mu\kappa/2. \end{aligned} \quad (19)$$

由于 $L(t, \mathbf{x})$ 连续可微,因此对于某个正常数 $a = \sup_{\mathbf{x} \in \Xi} \{W_1(\mathbf{x})\} < c$,存在紧集 $\Theta = \{a \leq L(t, \mathbf{x}) \leq c\}$,则由不等式(19)可知集合 $\Omega_a = \{L(t, \mathbf{x}) \leq a\}$ 和 $\Omega_c = \{L(t, \mathbf{x}) \leq c\}$ 是两个正不变集,因为在边界 $\partial\Omega_a$ 和 $\partial\Omega_c$ 上, \dot{L} 为负,所以始于 Ξ 内的轨线一定沿 $L(t, \mathbf{x})$ 减小的方向运动.

对式(19)两边同时对 t 进行积分得

$$\begin{aligned} L(t, \mathbf{x}) &\leq L(t, \mathbf{x}_0) - \mu\kappa(t - t_0)/2 \leq \\ &c - \mu\kappa(t - t_0)/2. \end{aligned} \quad (20)$$

上式说明 $L(t, \mathbf{x})$ 将在时间区间 $[t_0, t_0 + 2(c - a)/(\mu\kappa)]$ 内收敛到紧集 $\Omega_a = \{L(t, \mathbf{x}) \leq a\}$ 内.

证毕.

定义闭环系统(1)的Lyapunov函数:

$$\begin{aligned} V &= S^T S/2 + \sum_{i=1}^{n-1} (\mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i + \mathbf{b}_i^T \mathbf{b}_i)/2 + \\ &\sum_{i=1}^n \text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^T \Lambda_i^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i)/2. \end{aligned} \quad (21)$$

对 V 按时间 t 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T \dot{S} + \sum_{i=1}^{n-1} (\mathbf{e}_i^T \dot{\mathbf{e}}_i + \mathbf{b}_i^T \dot{\mathbf{b}}_i) + \\ &\sum_{i=1}^n \text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^T \Lambda_i^{-1} \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_i). \end{aligned} \quad (22)$$

由 $\mathbf{b}_i = \mathbf{z}_i - \mathbf{v}_i$ 得: $\dot{\mathbf{b}}_i = -\mathbf{b}_i/\tau_i - \dot{\mathbf{v}}_i$.由引理4.3^[6]知存在 \mathcal{K}_∞ 类函数 κ_{i1} 和 κ_{i2} 使

$$\kappa_{i1} \leq \|\dot{\mathbf{v}}_i\|^2 \leq \kappa_{i2}. \quad (23)$$

对 S 求导,将式(13)及控制律 \mathbf{u} 代入得

$$\dot{S} = AS + \Gamma S^{\rho_1/\rho_2} - \tilde{\boldsymbol{\theta}}_n^T \boldsymbol{\zeta}_n + \boldsymbol{\varepsilon}_n. \quad (24)$$

将上式及自适应律代入式(22),并根据假设1及式(23)得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \\ &\sum_{i=1}^{n-1} [-k_i^* \|\mathbf{e}_i\|^2 + (\frac{g_{i1}^2}{4} - \frac{1}{\tau_i} - \frac{\kappa_{i2}}{2\eta_i}) \|\mathbf{b}_i\|^2] + \\ &\phi - \sum_{i=1}^n \delta_i \lambda_{\max}(\Lambda_i) \text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^T \Lambda_i^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i)/2 + S^T A^* S. \end{aligned} \quad (25)$$

其中:

$$\phi = \sum_{i=1}^{n-1} \eta_i/2 + \sum_{i=1}^n [\delta_i \|\boldsymbol{\theta}_i^*\|^2/2 + \|\boldsymbol{\varepsilon}_i^*\|^2/4],$$

$$k_i^* = -k_i + 2, A^* = A + I.$$

令

$$\mu = 2 \min_{1 \leq i \leq n} \{k_i^*, \delta_i \lambda_{\max}(\Lambda_i)/2, \lambda_{\max}(-A^*)\},$$

$$\eta_i = \kappa_{i2}/[2(\mu - 1/\tau_i + g_{i1}^2/4)],$$

将其代入式(25),得

$$\dot{V} \leq -\mu V + \phi. \quad (26)$$

定理 1 考虑闭环系统(1),给定已知有界输入参考信号 \mathbf{y}_r 及初始紧集

$$\begin{aligned} \Omega_0 &= \{S^T S + \sum_{i=1}^{n-1} (\mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i + \mathbf{b}_i^T \mathbf{b}_i) + \\ &\sum_{i=1}^n \text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^T \Lambda_i^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_i) \leq 2p\}, \end{aligned}$$

p 为给定任意正数,在假设1,2的条件下,采用控制律(15)和自适应律(5)(10)(16),则选择适当控制器参数 k_i, δ_i, Λ_i ,可以保证闭环系统所有状态有界.

证 令 $\mu > \phi/p$,则当 $V = p$ 时, $\dot{V} \leq 0$,因而 $V \leq p$ 为不变集,因此,当系统满足初始条件 $V(0) \leq p$ 时,可得到

$$V \leq p. \quad (27)$$

由上式可知闭环系统(1)的模糊系统估计值 $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i$ 及跟踪误差 \mathbf{e}_i 有界.由 $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{y}_r$ 知状态 \mathbf{x}_1 有界,根据式(4)知 \mathbf{v}_1 有界,即 \mathbf{z}_1 及 $\dot{\mathbf{z}}_1$ 有界,根据式 $\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \mathbf{z}_1$ 知,状态 \mathbf{x}_2 有界,以此类推,闭环系统所有状态有界.

由于状态及自适应参数有界,则 $\|\dot{\mathbf{v}}_i\| \leq M_i$ 有界.参数 η_i 可取值为 $M_i/[2(-\mu + 1/\tau_i - g_{i1}^2/4)]$,则 ϕ 为常数.

对式(26)两边从 $[0, t]$ 积分得

$$V(t) \leq [V(0) - \phi/\mu]e^{-\mu t} + \phi/\mu. \quad (28)$$

根据式(21)得

$$\sum_{i=1}^{n-1} \|\mathbf{e}_i\|^2 \leq 2[V(0) - \phi/\mu]e^{-\mu t} + 2\phi/\mu,$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \|\mathbf{b}_i\|^2 \leq 2[V(0) - \phi/\mu]e^{-\mu t} + 2\phi/\mu,$$

$$\|S\|^2 \leq 2[V(0) - \phi/\mu]e^{-\mu t} + 2\phi/\mu,$$

$$\sum_{i=1}^n \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i\|^2 \leq 2\rho_{\min}(\Lambda_i)[(V(0) - \frac{\phi}{\mu})e^{-\mu t} + \frac{\phi}{\mu}].$$

$\forall t \geq 0$,由上述表达式可得到如下结果:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{n-1} \|\mathbf{e}_i\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{n-1} \|\mathbf{b}_i\| =$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{n-1} \|S\| = \sqrt{2\phi/\mu}, \quad (29)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \|\tilde{\theta}_i\| = \sqrt{2\rho_{\min}(\Lambda_i)\phi/\mu}. \quad (30)$$

定义增广误差向量

$$E(t) = [e_1^T, \dots, e_{n-1}^T, b_1^T, \dots, b_{n-1}^T, \tilde{\theta}_1^T, \dots, \tilde{\theta}_n^T, S^T]^T,$$

则闭环系统的Lyapunov函数可写成如下形式:

$$V = E^T(t)\Sigma^{-1}E(t)/2, \quad (31)$$

其中: $\Sigma = \text{diag}\{I_{2n-2}, \text{diag}\{\Lambda_i\}, 1\}$, I_{2n-2} 为 $2n - 2$ 维单位阵, 则如下不等式成立:

$$2\lambda_{\max}(\Sigma)\|E(t)\|^2 \leq V \leq 2\lambda_{\min}(\Sigma)\|E(t)\|^2. \quad (32)$$

则根据式(31)(32)可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|E(t)\|^2 = 2[3 + \lambda_{\min}(\Lambda_i)]\phi/\mu. \quad (33)$$

由上式及式(28), 式(33)可化为如下形式:

$$a \leq V \leq p. \quad (34)$$

其中

$$a = [3 + \lambda_{\min}(\Lambda_i)]\phi/\mu.$$

定义紧集

$$\Xi_2 = \{W_1 \leq p \text{ 和 } W_2 < p\},$$

其中:

$$W_1 = a, W_2 = 2\lambda_{\min}(\Sigma)\|E(t)\|^2,$$

则根据引理1知, V 函数将在有限时间 $[t_0, t_0 + 2(p - a)/(\mu\kappa)]$ 内收敛到紧集 $\Omega_V = \{V(t, E) \leq a\}$ 内, 其中 κ 为紧集 Ξ_2 上 V 的极小值, 即 $\kappa = a$. 显然系统误差将在有限时间内收敛到有界紧集 $\Omega_E = \{E(t) | \lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = \sqrt{2[3 + \lambda_{\min}(\Lambda_i)]\phi/\mu}\}$ 内.

证毕.

备注 若滤波器时间常数过小, 容易使系统不稳定, 若时间常数过大, 则造成幅值和相位失真, 一般情况下, 可以取值在0.01到0.05之间, 效果较好.

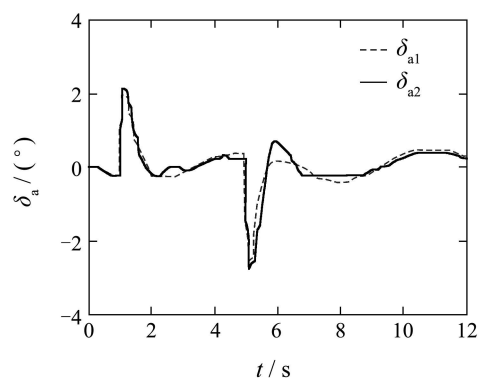
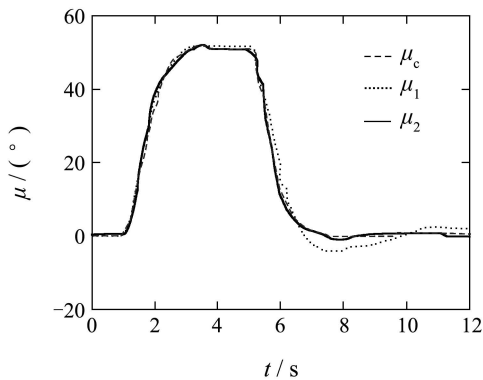
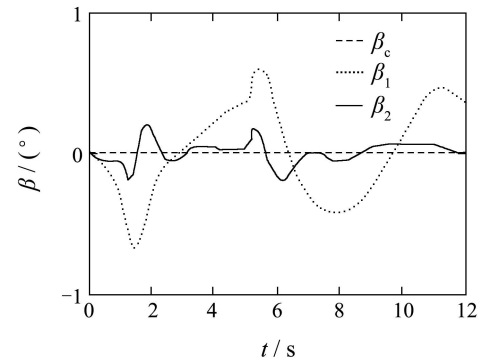
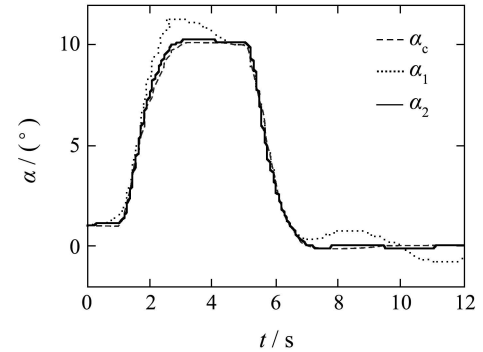
4 仿真(Simulation)

为了验证方法有效性, 设计了某战斗机的飞行控制系统, 并进行了协调转弯机动仿真. 该战斗机姿态动力学方程描述如下^[7]:

$$\begin{aligned} \dot{\Omega} &= f_s(\vec{x}_{s1}) + g_{s1}(\vec{x}_{s1})\omega + \psi_1, \\ \dot{\omega} &= f_f(\vec{x}) + g(\vec{x})\delta + \psi_2. \end{aligned} \quad (35)$$

其中: $\Omega = [\alpha, \beta, \mu]^T$ 为姿态角, $\omega = [p, q, r]^T$ 为姿态角速度, $\delta = [\delta_c, \delta_a, \delta_r]^T$ 为舵面偏转; $\psi_1 = \Delta f_s + g_{s2}\delta + d_1$, $\psi_2 = \Delta f_f + \Delta g\delta + d_2$ 为复合干扰. 控制系统设计任务为设计 δ , 使飞机能稳定跟踪指令 Ω_c .

仿真初始条件为: 发动机推力为80 kN, 高度 $h = 3000$ m, $V = 200$ m/s. 假设气动参数摄动20%, 另外在3个通道加入 $\{0.45 \ 1.5 \ 1.9\} \times 10^4 \sin t$ (kN·m)的力矩干扰. 图1给出了仿真结果, 其中下标 c 表示指令信号. 下标1,2分别表示未加模糊系统补偿及有模糊系统补偿的仿真结果. 可以看出, 控制系统能够稳定跟踪系统的制导指令, 较好地完成飞行任务.



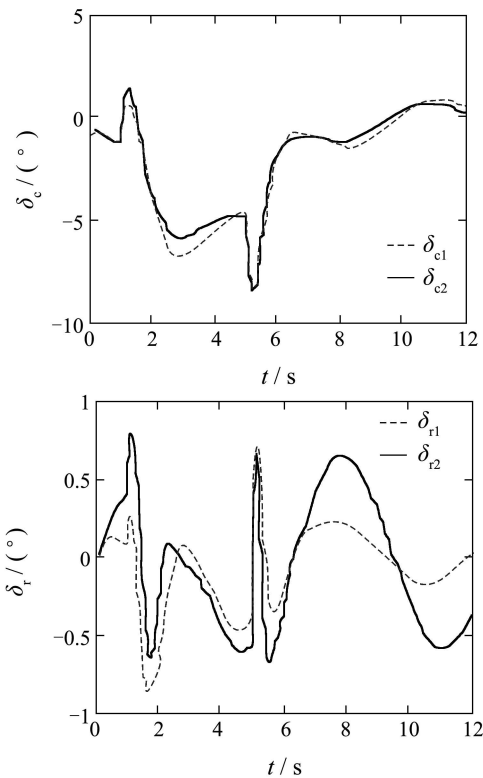


图1 飞行控制系统仿真结果

Fig. 1 Simulation results of flight control system

5 结论(Conclusion)

针对不确定严格反馈块控非线性系统,提出了一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模控制方法.系统的复合干扰由模糊系统在线逼近,利用自适应反步法设计了变结构控制的终端滑模面,并由此得到具有全局收敛的自适应终端滑模跟踪控制器,使闭环系统所有信号最终有界并且跟踪误差在有限时间内收敛到给定轨迹的任意小的有界紧集内.对某战斗机的机动仿真表明,该方法具有强鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] MAN Z H, PABLINSKI A P, WU H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(2): 2464 – 2469.
- [2] TAO C W, TAUR J S, CHAN M L. Adaptive fuzzy terminal sliding mode controller for linear systems with mismatched time-varying uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, 2004, 34(1): 255 – 262.
- [3] 张袅娜, 张德江, 冯勇. 基于混沌遗传算法的柔性机械手滑模控制器优化设计[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(3): 451 – 455.
(ZHANG Niaoona, ZHANG Dejiang, FENG Yong. The optimal design of terminal sliding controller for flexible manipulators base on chaotic genetic algorithm[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(3): 451 – 455.)
- [4] 王艳敏, 冯勇, 韩向伟. 不确定多变量系统的高阶滑模控制[J]. *控制与决策*, 2008, 23(4): 455 – 459.
(WANG Yanmin, FENG Yong, HAN Xiangwei. High-order sliding mode control of uncertain multivariable systems[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(4): 455 – 459.)
- [5] SWAROOP S, HEDRICK J K, YIP P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(10): 1893 – 1899.
- [6] KHALIL H K. *Nonlinear Systems*[M]. Third Edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 2002: 145 – 146.
- [7] SNELL S A, ENNS D F, GARRARD W L. Nonlinear inversion flight control for a supermaneuverable aircraft[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1992, 15(4): 976 – 984.

作者简介:

周丽 (1976—), 女, 博士研究生, 研究方向为智能控制、非线性鲁棒自适应控制等, E-mail: lk_zhouli@163.com;

姜长生 (1942—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制、非线性鲁棒控制和综合火飞控制等;

都延丽 (1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为智能控制、非线性鲁棒自适应控制等.