

文章编号: 1001-0920(2012)10-0000-00

非匹配不确定系统的自适应反步非奇异快速终端滑模控制

李浩^{1a,1b}, 窦丽华^{1a,1b}, 苏中²

(1. 北京理工大学 a. 自动化学院, b. 复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室, 北京 100081; 2. 北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对一类 n 阶非匹配不确定系统, 提出一种自适应反步非奇异快速终端滑模控制方法. 控制的前 $n-1$ 步采用自适应反步控制策略, 消除非匹配不确定性的影响; 最后一步利用误差的积分构造非奇异快速终端滑模面, 设计控制律使系统第 n 个状态有限时间收敛. 该方法对系统中匹配和非匹配不确定项均具有鲁棒性, 比自适应反步终端滑模方法具有更快的收敛速度. 理论分析证明了闭环系统的稳定性, 仿真结果验证了该方法的有效性.

关键词: 非奇异快速终端滑模控制; 自适应控制; 反步控制; 非匹配不确定性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Adaptive backstepping non-singular fast terminal sliding mode control for mismatched uncertain systems

LI Hao^{1a,1b}, DOU Li-hua^{1a,1b}, SU Zhong²

(1a. School of Automation, 1b. Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision of Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology of Ministry of Education, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100081, China. Correspondent: LI Hao, E-mail: lhnewmind@163.com)

Abstract: An adaptive backstepping non-singular fast terminal sliding mode control is proposed for a class of n -order systems with mismatched uncertainties. For the first $n-1$ steps, the backstepping method is adopted and uncertain parameters are estimated by using adaptive law, thus the mismatched uncertainties are restrained. A non-singular fast terminal sliding mode is conformed with the integration of the error in the n -th step, and control law is designed to achieve the finite time convergence of the n -th system state. As a whole the system is robust to both matched and mismatched uncertainties. In comparison with the adaptive backstepping terminal sliding method, the proposed control method enhances the convergence rate. Theory analysis proves the stability of the close-loop system, and simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: non-singular fast terminal sliding mode control; adaptive control; backstepping; mismatched uncertainty

1 引言

不确定系统的控制是控制领域的热点问题, 滑模控制是处理系统中不确定性的有效方法之一. 当不确定性满足匹配条件时, 滑模控制具有“不变性”^[1], 其控制器设计简单, 鲁棒性强, 在电机、机械臂、倒立摆等系统控制中得到广泛应用^[2]. 而对于非匹配不确定性, 滑模控制则不再具有“不变性”, 丧失了强鲁棒性. 反步设计方法是解决非匹配不确定性问题的一种控制策略, 它在中间过程的每一步引入虚拟控制量, 通过逐步递推修正控制算法, 并基于 Lyapunov 稳定性理

论来设计实现系统稳定控制的控制器^[3].

将滑模控制与自适应反步控制相结合, 可实现对非匹配不确定系统的控制, 并提高系统鲁棒性. 文献 [4] 提出了一种逐步递推的多滑模面自适应控制策略, 简化了高阶系统的控制问题, 并应用于电液伺服系统的跟踪控制中, 设计了虚拟控制量相互解耦的控制器; [5] 在反步设计的最后一步使用滑模控制, 使反步控制可应用于更一般的非线性系统, 并提高了滑模控制对非匹配不确定性的鲁棒性能; [6] 在线性感应电机的跟踪控制中将自适应反步控制和滑模控

收稿日期: 2011-04-21; 修回日期: 2011-08-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60972118); 北京市普通高校重点实验室 (自动控制系统) 项目 (CSYS100070417).

作者简介: 李浩(1982-), 男, 博士生, 从事滑模控制、自适应控制等研究; 窦丽华(1961-), 女, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、模式识别等研究; 苏中(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事导航、制导与控制等研究.

制相结合,采用自适应方法对摩擦、负载和系统参数构成的集总不确定性的上界进行估计,利用滑模控制保证系统的鲁棒性,系统具有良好的响应性能,并在 FPGA 平台上实现了该算法^[7]; [4-7]中使用的是传统的线性滑模控制,为了提高系统的收敛速度; [8]针对一类参数严格反馈的不确定非线性系统,在自适应反步设计的最后一步使用非奇异终端滑模控制,使系统最后一个状态有限时间收敛,从而提高了系统的收敛速度和稳态跟踪精度; [9]则在严格反馈块控非线性系统的最后一步基于自适应反步法的结果设计终端滑模面,得到具有全局收敛的自适应终端滑模控制器,并应用于战斗机 6 自由度机动控制中. 然而,文献 [8-9]中采用的终端滑模面只有在系统平衡点附近才具有快速收敛性,当系统状态远离平衡点时,终端滑模控制的收敛速度不如线性滑模控制.

本文针对 n 阶参数严格反馈的非匹配不确定系统,提出一种自适应反步非奇异快速终端滑模控制方法,使系统对匹配不确定性和非匹配不确定性均具有鲁棒性. 系统控制的前 $n-1$ 步采用反步控制策略,设计了自适应律估计系统的未知参数,从而抑制了非匹配扰动对系统的影响. 第 n 步采用非奇异快速终端滑模控制,可保证系统的第 n 个状态有限时间收敛,从而实现系统的稳定控制. 非奇异快速终端滑模控制使系统在远离平衡点和平衡点附近都具备快速收敛性,可以提高系统的收敛速度和稳态跟踪精度.

2 问题描述

考虑如下 n 阶参数严格反馈系统^[3]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} + \phi_i^T(x_1, x_2, \dots, x_i)\theta, \\ \quad i = 1, 2, \dots, n-1; \\ \dot{x}_n = f(x) + bu + \Delta F(t); \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为系统状态向量, $x \in R^n$, x 可测; $u, y \in R^1$, u 和 y 分别为系统输入和输出; $f(x)$ 为已知函数; b 为已知常数, $b \neq 0$; $\Delta F(t)$ 为满足匹配条件的不确定项; $\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \in R^m$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 为系统状态的函数; $\theta \in R^m$ 为未知参数; $\phi_i^T(x_1, x_2, \dots, x_i)\theta$ 为系统中的非匹配不确定项.

假设 1 未知参数 θ 有界,且界值已知即 $\theta \in \{\theta : \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}\}$. 其中: θ_{\min} 和 θ_{\max} 分别为 θ 的最大值和最小大值,且 θ_{\min} 和 θ_{\max} 已知.

假设 2 $\Delta F(t)$ 有界,即 $\exists \zeta > 0$,使得 $|\Delta F(t)| \leq \zeta$,且 ζ 已知.

本文的控制目的是:针对系统 (1),在满足假设 1,假设 2 的条件下,设计自适应反步快速终端滑模控制,使系统输出 y 跟踪有界的期望轨迹 x_d ,并对系统中不

确定性具有鲁棒性.

3 适应反步快速终端滑模控制

自适应反步控制中采用逐步递推的设计步骤,首先定义系统误差;然后,在每一步设计虚拟控制量和用于参数估计的调节函数,使每个子系统具备 Lyapunov 稳定性,从而消除可参数化非匹配不确定性的影响^[3].

本文的自适应反步非奇异快速终端滑模控制方法在控制的前 $n-1$ 步与文献 [8] 类似,使用自适应反步控制策略处理参数化非匹配不确定项;而在第 n 步则采用非奇异快速终端滑模控制,利用第 n 步误差和误差的积分构造非奇异快速终端滑模面,并设计控制律使第 n 步误差有限时间收敛,抑制匹配不确定性的影响. 所设计的控制器可实现整个系统的稳定控制,并使系统对匹配和非匹配不确定性均具有鲁棒性.

3.1 自适应反步控制

定义系统 (1) 的误差为

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - x_d; \\ e_i = x_i - \alpha_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, n. \end{cases} \quad (2)$$

其中 α_i 为第 i 步的虚拟控制量. 由文献 [3] 可知

$$\begin{cases} \alpha_1 = -c_1 e_1 - \omega_1^T \hat{\theta}, \\ \alpha_i = -e_{i-1} - c_i e_i + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} x_{k+1} - \\ \quad \omega_i^T \hat{\theta} + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{\theta}} \Gamma \tau_i + v_i. \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \omega_i &= \phi_i - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} \phi_k, \quad \tau_i = \sum_{k=1}^i \omega_k e_k, \\ v_i &= \sum_{k=1}^{i-2} e_{k+1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{\theta}} \Gamma \omega_i, \quad i = 2, 3, \dots, n-1; \end{aligned}$$

Γ 为正定对角矩阵; $c_i > 0$, $i = 1, 2, \dots, n-1$; $\hat{\theta}$ 为参数 θ 的估计值.

在反步设计的每一步定义 Lyapunov 函数为

$$V_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^i e_k^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma \tilde{\theta}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1,$$

则第 $n-1$ 步^[3]为:

$$V_{n-1} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} e_k^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma \tilde{\theta}, \quad (4)$$

对 V_{n-1} 求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{n-1} &= - \sum_{k=1}^{n-1} c_k e_k^2 + e_{n-1} e_n + \\ & \sum_{k=1}^{n-2} e_{k+1} \frac{\partial \alpha_k}{\partial \hat{\theta}} (\Gamma \tau_{n-1} - \dot{\hat{\theta}}) + \tilde{\theta}^T (\tau_{n-1} - \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}}). \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中,若选择自适应律为

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma \tau_{n-1}, \quad (6)$$

则有

$$\dot{V}_{n-1} = - \sum_{k=1}^{n-1} c_k e_k^2 + e_{n-1} e_n. \quad (7)$$

如果设计控制律使 e_n 收敛到零,则 $\dot{V}_{n-1} \leq 0$,从而保证 e_1, e_2, \dots, e_n 构成的子系统稳定.

3.2 非奇异快速终端滑模控制

为了使 e_n 有限时间收敛到零,受文献[8]的启发,本文在最后一步设计非奇异快速终端滑模控制(NFTSMC).定义如下切换函数:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \int_0^t e_n d\tau, \\ \sigma_2 = \sigma_1 + \frac{\beta}{2-\gamma} |\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1|^{2-\gamma} \text{sign}(\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1). \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\beta > 0; c_n > 0; \gamma = z_1/z_2$. 这里: z_1, z_2 为大于零的互质奇数,且 $z_1 < z_2$. 系统状态到达滑模面之后 ($\sigma_2 = 0$),将在有限时间 t_1 内收敛到平衡点^[10]

$$t_1 = \frac{1}{c_n \gamma'} \ln \frac{c_n |\sigma_1(t_0)|^{\gamma'} - \beta'}{\beta'}. \quad (9)$$

其中 t_0 为系统到达滑模面 σ_2 的时间,

$$\gamma' = \frac{1-\gamma}{2-\gamma}, \beta' = \left(\frac{2-\gamma}{\beta}\right)^{\frac{1}{2-\gamma}}.$$

注 1 式(8)中,若令 $c_n = 0$,则可得非奇异终端滑模面(NTSM).由于NTSM只有当系统状态在平衡点附近时才具有快速收敛性^[10],而NFTSM在远离平衡点和在平衡点附近时均具有快速收敛性^[11],因此NFTSM具有比NTSM更快的收敛速度.

注 2 文献[8]使用 e_n 及其导数 \dot{e}_n 构造滑模面,由于 \dot{e}_n 不可测,需要设计观测器对 \dot{e}_n 进行估计.而式(8)中采用误差的积分来构造滑模面,不需要 e_n 的导数信息,因此不需要额外设计观测器.

对 σ_2 求导,可得^[10]

$$\dot{\sigma}_2 = \dot{\sigma}_1 + \beta |\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1|^{1-\gamma} (\ddot{\sigma}_1 + c_n \dot{\sigma}_1). \quad (10)$$

令

$$\begin{aligned} Z(\sigma_1) &= \frac{1}{\beta} |\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1|^\gamma \text{sign}(\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1) + \\ &\quad \frac{c_n}{2-\gamma} (\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1), \end{aligned} \quad (11)$$

则

$$\beta |\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1|^{1-\gamma} Z(\sigma_1) = \dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_2, \quad (12)$$

因此由式(12)可得

$$\dot{\sigma}_2 = -c_n \sigma_2 + \beta'' [\ddot{\sigma}_1 + c_n \dot{\sigma}_1 + Z(\sigma_1)], \quad (13)$$

其中 $\beta'' = \beta |\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1|^{1-\gamma}$.

再由式(1)~(3)和(8)可知

$$\ddot{\sigma}_1 = \dot{e}_n = \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} =$$

$$f(x) + bu + \Delta F(t) - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_k} x_{k+1} -$$

$$\frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} - \theta^T \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_k} \phi_k =$$

$$f(x) + bu + \Delta F(t) - G_1 - \theta^T G_2. \quad (14)$$

其中

$$G_1 = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_k} x_{k+1} + \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}}, \quad G_2 = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_k} \phi_k.$$

那么,由式(13)和(14)可得

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_2 &= -c_n \sigma_2 + \beta'' [f(x) + bu + \Delta F(t) - \\ &\quad G_1 - \theta^T G_2 + c_n \dot{\sigma}_1 + Z(\sigma_1)]. \end{aligned} \quad (15)$$

因此,可设计控制量为

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{b} [-f(x) - c_n \sigma_1 - Z(\sigma_1) + G_1 - \\ &\quad (\|G_2\| \cdot \|\theta\|_{\max} + k) \text{sign}(\sigma_2)]. \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $k \geq \zeta + \varepsilon, \varepsilon > 0; \|\bullet\|$ 为 \bullet 的范数.

4 稳定性证明

定理 1 对于系统(4),当采用式(16)的控制律和式(6)的自适应律时, x_n 有限时间收敛,则系统稳定.

证明 对系统控制的第 n 步,选择 Lyapunov 函数为 $V_\sigma = \frac{1}{2} \sigma_2^2$,则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_\sigma &= \sigma_2 \dot{\sigma}_2 = \\ &= -c_n \sigma_2^2 + \beta'' \sigma_2 [f(x) + bu + \Delta F(t) - \\ &\quad G_1 - \theta^T G_2 + c_n \dot{\sigma}_1 + Z(\sigma_1)] = \\ &= -c_n \sigma_2^2 + \beta'' \sigma_2 [-(\|G_2\| \cdot \|\theta\|_{\max} + k) \text{sign}(\sigma_2) + \\ &\quad \Delta F(t) - \theta^T G_2] \leq \\ &= -c_n \sigma_2^2 + \beta'' |\sigma_2| [-(\|G_2\| \cdot \|\theta\|_{\max} + k) + \\ &\quad (\|\theta\| \cdot \|G_2\| + |\Delta F(t)|)] \leq \\ &= -c_n \sigma_2^2 - \beta'' \varepsilon |\sigma_2| \leq -2\beta'' \varepsilon \sqrt{V_\sigma}. \end{aligned} \quad (17)$$

当 $\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1 \neq 0$ 时, $\beta'' > 0$,由式(17)可知, V_σ 有限时间收敛,即系统状态有限时间内到达滑模面 σ_2 .

当 $\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1 = 0$ 且 $\sigma_2 \neq 0$ 时, $\beta'' = 0$,由式(17)不能得出 V_σ 有限时间收敛.但可以证明 $\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1 = 0$ 且 $\sigma_2 \neq 0$ 不是系统的吸引子,系统状态有限时间内到达滑模面 σ_2 .

令 $d(\sigma_1) = \dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1$. 当 $\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1 = 0$ 时, $Z(\sigma_1) = 0$. 由式(14)和(16)可得

$$\begin{aligned} \dot{d}(\sigma_1) &= \ddot{\sigma}_1 - c_n \dot{\sigma}_1 = \\ &= f(x) + bu + \Delta F(t) - G_1 - \theta^T G_2 - c_n \dot{\sigma}_1 = \\ &= -(\|G_2\| \cdot \|\theta\|_{\max} + k) \text{sign}(\sigma_2) + \Delta F(t) - \theta^T G_2, \end{aligned} \quad (18)$$

假设 $\sigma_2 > 0$, 则有

$$\begin{aligned} & -(\|G_2\| \cdot \|\theta\|_{\max} + k)\text{sign}(\sigma_2) + \Delta F(t) - \theta^T G_2 = \\ & -\|G_2\| \cdot \|\theta\|_{\max} - k + \Delta F(t) - \theta^T G_2 \leq -\varepsilon, \quad (19) \end{aligned}$$

所以 $\dot{\sigma}_1 < 0$; 假设 $\sigma_2 < 0$, 由类似过程可得 $\dot{\sigma}_1 > 0$. 由文献 [11] 可知, $\dot{\sigma}_1 + c_n \sigma_1 = 0$ 且 $\sigma_2 \neq 0$ 不是系统的吸引子, 系统状态在有限时间内到达滑模面 σ_2 .

当系统状态到达滑模面 σ_2 之后, 由式 (8) 和 (9) 可知, σ_1 有限时间收敛. 而当 $\sigma_2 = \sigma_1 = 0$ 时, $\dot{\sigma}_1 = e_n = 0$, 因此系统状态 x_n 有限时间收敛.

选择 Lyapunov 函数为 $V_n = V_{n-1} + V_\sigma$, 则由式 (7) 有

$$\dot{V}_n = -\sum_{k=1}^{n-1} c_k e_k^2 + e_{n-1} e_n + \dot{V}_\sigma. \quad (20)$$

由于 V_σ 有限时间收敛, e_n 有限时间之内为 0, 由式 (16) 和 (19), 有

$$\dot{V}_n = -\sum_{k=1}^{n-1} c_k e_k^2 + \dot{V}_\sigma \leq -\sum_{k=1}^{n-1} c_k e_k^2 \leq 0. \quad (21)$$

由式 (21) 易知 $\int_0^\infty c_k e_k^2 d\tau < \infty$, 根据 Barbalat 引理可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $e_k^2 \rightarrow 0$. 因此系统稳定, 且系统输出 y 能跟踪有界轨迹 x_d .

5 仿真与分析

考虑如下系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \theta(x_1 + 0.3)^2, \\ \dot{x}_2 = x_1 \cos x_2 + x_2 + 2.5u + \Delta F(t). \end{cases} \quad (22)$$

由式 (1) 可知, $\phi_1(x_1) = (x_1 + 0.3)^2$, $f(x) = x_1 \cos x_2 + x_2$, $b = 2.5$, $\theta = 0.5$, $\Delta F(t) = 2[\text{rand}(0,1) - 1]$, 这里 $\text{rand}(0,1)$ 表示 $[0, 1]$ 之间的随机数. 仿真时假设 θ 未知, 且其界为 $\theta_{\min} = 0$, $\theta_{\max} = 1$. 控制目标是调节输出 y 至给定 $x_d = 2$, 系统初始状态均为 0. 采用 Matlab/Simulink 中的 ODE4 仿真算法, 仿真时长 5 s, 仿真步长 1 ms. 仿真时为了降低抖振, 在控制量 u 中采用双曲正切函数 $\tanh(900\sigma_2)$ 代替符号函数 $\text{sign}(\sigma_2)$. 对如下两种控制器进行仿真:

1) 自适应反步非奇异快速终端滑模控制 (ABNFTSMC). 控制器参数为: $c_1 = c_2 = 10$, $\Gamma = 1$, $\beta = 0.1$, $\gamma = 3/5$, $k = 1$, 参数估计初值为 $\hat{\theta}(0) = 0$.

2) 自适应反步非奇异终端滑模控制 (ABNTSMC). 控制器参数为 $c_2 = 0$, 其余参数与 ABNFTSMC 中一致.

图 1 和图 2 分别为系统误差 e_1 和 e_2 . 由图 1 和图 2 可知, 两种方法均能保证误差有界, 且 e_2 有限时间收敛, 但 ABNFTSMC 比 ABNTSMC 的收敛速度快. 图 3 为系统控制量, 采用双区正切函数代替符号函数可降低系统抖振. 图 4 为参数估计值, 由于式 (22) 的

系统满足参数收敛条件^[3], 参数估计值能收敛到真值.

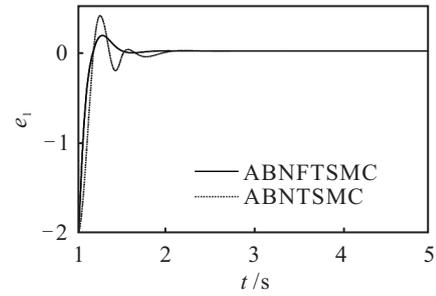


图 1 误差 e_1 .

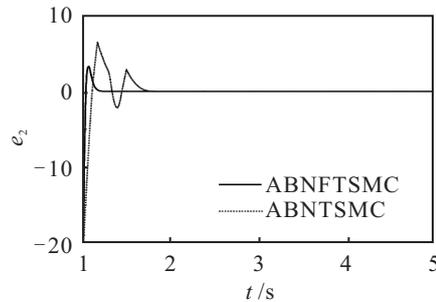


图 2 误差 e_2 .

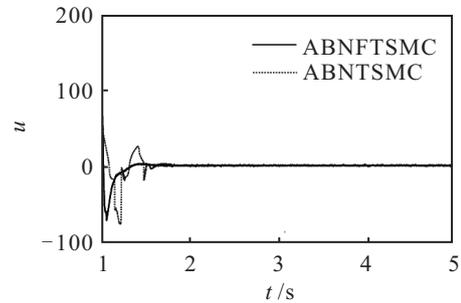


图 3 系统控制量

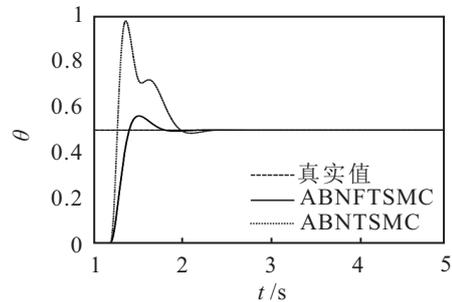


图 4 参数估计值.

6 结论

本文针对 n 阶参数严格反馈的非匹配不确定系统, 提出了一种自适应反步非奇异快速终端滑模控制方法. 在系统控制的前 $n-1$ 步采用反步控制策略, 并设计自适应律对不确定参数进行估计, 消除非匹配不确定性对系统的影响; 在控制的最后一步设计非奇异快速终端滑模控制, 使系统第 n 个状态有限时间收敛, 从而实现整个系统的稳定控制, 并使系统对匹配和非匹配不确定性均具有鲁棒性. 与自适应反步终端滑模控制相比, 本文方法具有更快的收敛速度.

参考文献(References)

- [1] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 225-233.
(Gao W B. Vibration control theory and design methods[M]. Beijing: Science Press, 1996: 225-233.)
- [2] Utkin V, Guldner J, Shi J. Sliding modes in electromechanical system[M]. London: Taylor & Francis, 1999: 47-318.
- [3] Kristic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P. Nonlinear and adaptive control design[M]. New York: Wiley, 1995: 12-13.
- [4] 管成, 朱善安. 电液伺服系统的多滑模鲁棒自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 931-938.
(Guan C, Zhu S A. Multiple sliding mode robust adaptive control of an electro-hydraulic servo system[J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(6): 931-938.)
- [5] Gu W J, Zhao H C, Pan C P. Sliding mode control for an aerodynamic missile based on backstepping design[J]. J of Control Theory and Applications, 2005, 3(1): 71-75.
- [6] Lin F J, Shen P H, Hsu S P. Adaptive backstepping sliding mode control for linear induction motor drive[J]. IEE Proc of Electrical Power Application, 2002, 149(3): 184-194.
- [7] Lin F J, Chang C K, Huang P K. FPGA-based adaptive backstepping sliding-mode control for linear induction motor drive[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(4): 1222-1231.
- [8] 郑剑飞, 冯勇, 郑雪梅, 等. 不确定非线性系统的自适应反演终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(4): 410-414.
(Zheng J F, Feng Y, Zheng X M, et al. Adaptive backstepping-based terminal-sliding mode control for uncertain nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(4): 410-414.)
- [9] 周丽, 姜长生, 都延丽. 一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 678-682.
(Zhou L, Jiang C S, Du Y L. A robust and adaptive terminal sliding mode control based on backstepping[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(6): 678-682.)
- [10] Yu S, Du J, Yu X, et al. A novel recursive terminal sliding mode with finite-time convergence[C]. Proc of the 17th World Congress on the Int Federation of Automatic Control. Seoul, 2008: 5945-5949.
- [11] Feng Y, Yu X, Man Z. Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.