

# 南极大型望远镜跟踪系统的 鲁棒自适应控制研究\*

许丹丹<sup>1,2,3</sup> 杨世海<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042; 2. 中国科学院南京天文光学技术研究所  
天文光学技术重点实验室, 南京 210042; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 提出一种鲁棒自适应控制器的设计方案, 尤其适用于南极大型望远镜这样含有未知有界扰动, 未建模动态的非线性系统。文章基于 Lyapunov 函数法, 通过引入动态信号抑制未建模参量的影响, 并采用自适应阻尼抑制各种不确定性。理论证明, 所提出的鲁棒自适应控制器可保证跟踪系统的稳定性, 通过选择合适的参数能达到控制精度的要求。仿真结果表明, 本鲁棒自适应控制器的控制效果有很大改善。

**关键词** 南极大型望远镜, LAMOST, 跟踪控制, 鲁棒自适应, 非线性系统。

MR(2000) 主题分类号 93C40

## Robust Adaptive Control for Antarctic Large Telescope Tracking System

XU Dandan<sup>1,2,3</sup> YANG Shihai<sup>1,2</sup>

(1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics &  
Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences,  
Nanjing 210042; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** This paper presents a design scheme to robust adaptive controller, especially for nonlinear systems with unknown bounded disturbances and unmodeled dynamics, such as Antarctic large telescope. Based on Lyapunov function method, a dynamic signal is used to restrain the unmodeled dynamics and adaptive damping is presented to inhibit the effects of the uncertainties. It is proved theoretically that the proposed robust adaptive control scheme guarantees the stability of tracking system.

\* 国家自然科学基金 (11373052), 973 项目 (2013CB834901) 资助课题。

收稿日期: 2016-07-05, 收到修改稿日期: 2016-12-09.

编委: 夏元清。

Furthermore, the tracking error can be made arbitrarily small by choosing some design constants appropriately. Simulation results show that the controllers presented in this paper can improve the control performance greatly.

**Keywords** Antarctic large telescope, LAMOST, tracking control, robust adaptive, nonlinear system.

## 1 引言

近年来, 国内外在非线性系统的自适应控制研究方面取得了令人瞩目的成果<sup>[1-3]</sup>, 然而在大多数研究中, 诸如望远镜系统、宇航系统和风力发电系统等非线性系统都带有很多不确定性因素<sup>[4-6]</sup>. 因此, 研究带有不确定性非线性系统的控制问题具有很重要的意义. 文献[7]中采用的直接模型参考自适应对非线性系统进行控制, 但没有考虑外界扰动和未建模动态的影响. 文献[8]开始针对含有未建模动态非线性系统提出自适应控制的设计方法. 文献[9]针对飞行器非线性控制系统, 提出基于参数估计误差的鲁棒自适应律设计. 文献[10-12]针对未建模动态的非线性系统, 提出鲁棒自适应观测器的控制方案.

南极大型望远镜尚在计划中, 没有成型的对象提供给本文. 但南极望远镜预研究中, 其主轴控制主要借鉴了 LAMOST 望远镜, 所以本文设计的鲁棒自适应控制器的设计方案也以 LAMOST 主轴为控制对象. 本文借鉴文献[13-15]的鲁棒自适应输出反馈的设计方法, 设计一种鲁棒自适应控制器来解决带有未建模动态的南极大型望远镜跟踪控制问题. 仿真实验表明该控制方法能够保证输出跟踪参考信号, 大大提高了精度要求. 由于很多实际控制对象如振荡, 带有摩擦的控制系统等都属于非线性系统, 因此本文的设计方法具有广阔的应用前景<sup>[16]</sup>.

## 2 问题描述与基本假设

南极望远镜预研究中, 其主轴控制主要借鉴了 LAMOST 望远镜, 所以本文提出的鲁棒自适应控制器的设计方案也以 LAMOST 主轴为控制对象. 在望远镜伺服系统的运行过程中, 负载惯量, 扭矩和静摩擦发生变化是不可避免的, 尤其是望远镜处于低速运行的状态, 这时, 摩擦力的非线性特性会严重影响其跟踪精度<sup>[17]</sup>, 考虑轴摩擦力影响的伺服系统框图如下图 1 所示. 图中  $\dot{\theta}_r$  是转速指令信号, 它与测速计输出  $\dot{\theta}_p$  之差送到前置放大器, 放大器的输出  $z$  与待设计的自适应控制器输入  $u$  相加后, 送到功率放大器, 加到电机上的输入除了功放的输出外, 还有摩擦力的影响. 图中用  $f(\dot{\theta}_p)$  代表轴摩擦力, 它与  $\dot{\theta}_p$  的关系有明显的非线性. 由望远镜的方位轴伺服系统框图, 可得被控对象输入输出的关系, 给出(2.1)式的微分方程

$$\ddot{\theta}_p + 0.5\dot{\theta}_p = 100z + f(\dot{\theta}_p) + 100u, \quad (2.1)$$

其中,  $f(\dot{\theta}_p) = -\alpha \text{sgn}\dot{\theta}_p$ , 常数  $\alpha > 0$ ,  $\text{sgn}\dot{\theta}_p = \begin{cases} -1, & \dot{\theta}_p < 0, \\ 0, & \dot{\theta}_p = 0, \\ 1, & \dot{\theta}_p > 0. \end{cases}$

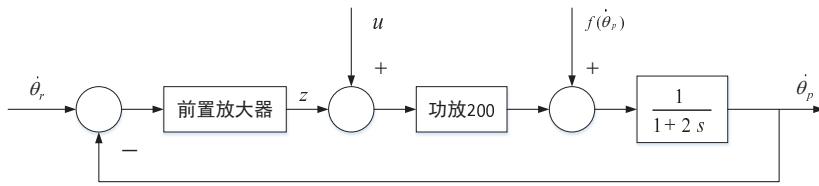


图 1 望远镜的方位轴伺服系统框图

(Figure 1 The orientation axis servo system block diagram of telescope)

在实际建模过程中, 需要对被控对象的数学模型进行必要的简化和假设. 因此, 被控对象总包含有未建模动态 [18]. 由于未建模动态的存在, 控制系统的品质会大大恶化, 甚至会导致自适应控制系统的不稳定. 本文为了研究存在未知有界干扰和未建模动态的南极大型望远镜跟踪系统, 设计鲁棒自适应控制器, 使闭环系统输出稳定. 在原模型中加入未建模动态和未知的有界扰动, 现将对象的微分方程改写成

$$\ddot{\theta}_p + 0.5\dot{\theta}_p = 100z + f(\dot{\theta}_p) + 100u + \Delta(\dot{\theta}_p, \omega) + d(t), \quad (2.2)$$

其中,  $\Delta(\dot{\theta}_p, \omega)$  表示不确定非线性以及和未建模动态  $\omega$  有关的不确定性,  $d(t)$  为未知的有界扰动.

**定义 2.1**<sup>[19]</sup> 给定一个控制系统  $\dot{x} = f(x, u)$ , 如果一个连续函数  $V$  满足

1) 存在  $K_\infty$  类函数  $\Psi_1, \Psi_2$ , 使得

$$\Psi_1(\|x\|) \leq V(x) \leq \Psi_2(\|x\|). \quad (2.3)$$

2) 存在  $K_\infty$  类函数  $\rho$  以及两个常数  $\tau_0 \geq 0, d_0 \geq 0$ , 使得

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x, u) \leq -\tau_0 V(x) + \rho(\|u\|) + d_0, \quad (2.4)$$

则称此函数  $V$  是指数输入到状态实用稳定 (exponentially input-to-state practically stable, exp-ISpS) 的 Lyapunov 函数. 同样, 在特殊情况  $d_0 = 0$  时, 称  $V$  为 exp-ISpS Lyapunov 函数.

为设计一个自适应控制器使跟踪系统稳定, 现有如下假设.

**假设 2.1** 未知非线性动态扰动  $\Delta(\dot{\theta}_p, \omega)$  满足

$$|\Delta(\dot{\theta}_p, \omega)| \leq c_1(\|\dot{\theta}_p\|) + c_2(\|\omega\|), \quad (2.5)$$

其中,  $c_1(\cdot)$  是未知非负的连续函数,  $c_2(\cdot)$  是未知非负的连续单调递增函数,  $\|\cdot\|$  表示向量的欧氏范数.

**假设 2.2** 未建模动态  $\omega$  满足以下方程

$$\dot{\omega} = q(\omega, \dot{\theta}_p), \quad (2.6)$$

其中,  $\Delta(\dot{\theta}_p, \omega)$  和  $q(\omega, \dot{\theta}_p)$  为未知的非线性 Lipschitz 连续函数.

**假设 2.3** 未建模动态是指数输入到状态实用稳定的 (exp-ISpS) 的, 即系统  $\dot{\omega} = q(\omega, \dot{\theta}_p)$  存在一个 Lyapunov 函数  $V_\omega(\omega)$ , 且满足以下关系

$$\Psi_1(\|\omega\|) \leq V_\omega(\omega) \leq \Psi_2(\|\omega\|), \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial V_\omega(\omega)}{\partial \omega} q(\omega, \dot{\theta}_p) \leq -\tau_0 V_\omega(\omega) + \rho(\|\dot{\theta}_p\|) + d_0, \quad (2.8)$$

其中,  $\Psi_1, \Psi_2$  为  $K_\infty$  类函数,  $\tau_0 \geq 0, d_0 \geq 0$  为已知常数. 不失一般性, 假设  $\rho(\cdot)$  具有形式  $\rho(h) = h^2 \rho_0(h^2)$ ,  $\rho_0$  为一个大于等于零的光滑函数, 或者可以将  $\rho$  表示为  $\|\dot{\theta}_p\|^2 \rho_0(\|\dot{\theta}_p\|^2) + \varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0 > 0$  为一个充分小的实数<sup>[20]</sup>.

### 3 控制器设计

首先, 引入如下动态信号  $\delta$  来抑制未建模动态对系统的影响

$$\dot{\delta} = -c_0 \delta + \delta_m(\dot{\theta}_p), \quad (3.1)$$

其中,  $c_0 \in (0, \tau_0)$ ,  $\delta_m = \|\dot{\theta}_p\|^2 \rho(\|\dot{\theta}_p\|^2) + d_0$ , 且  $\delta(0) = \delta^0 > 0$ .

对于未建模动态的 Lyapunov 函数, 有以下性质<sup>[19]</sup>

$$V_\omega(\omega(t)) \leq \delta(t) + D(t), \quad (3.2)$$

对所有的  $t \geq 0$ , 上式成立, 并且存在某个  $T^0$  对所有的  $t \geq T^0 \geq 0$ , 有  $D(t) = 0$ .

定义误差  $e = \dot{\theta}_p - \dot{\theta}_r$ , 由 (2.1) 式可以得到

$$\dot{e} = f(\dot{\theta}_p) - 0.5\dot{\theta}_p - 100e + 100u - \ddot{\theta}_r + \Delta(\dot{\theta}_p, \omega) + d(t). \quad (3.3)$$

由 (3.3) 式进一步化简可以得到如下式子

$$\dot{e} = f_1(\dot{\theta}_p) - 100e + 100u - \ddot{\theta}_r + \Delta(\dot{\theta}_p, \omega) + d(t). \quad (3.4)$$

令  $f_1(\dot{\theta}_p) = f(\dot{\theta}_p) - 0.5\dot{\theta}_p = -\alpha \text{sgn}(\dot{\theta}_p) - 0.5\dot{\theta}_p$ , 显然,  $|f_1(\dot{\theta}_p)| \leq \theta \cdot \overline{f_1}(\dot{\theta}_p)$ ,  $\theta > 0$  为未知常数,  $\overline{f_1}(\dot{\theta}_p) = [\alpha^2 + 0.5^2(\dot{\theta}_p)^2]^{\frac{1}{2}}$ .

在文献 [13] 基础上, 提出如下自适应控制器

$$u = -\beta e \{ \alpha^2 + 0.5^2(\dot{\theta}_p)^2 + (e + \dot{\theta}_r)^2 + [\Psi_1^{-1}(2\delta)]^2 + 1 \}. \quad (3.5)$$

本控制器中包含自适应参数  $\beta$ , 满足以下自适应律

$$\dot{\beta} = \beta_m - \Gamma \sigma \beta, \quad (3.6)$$

其中, (3.6) 式中的  $\Gamma > 0, \sigma > 0$  为设计常数,  $\beta_m$  如下所示

$$\beta_m = \Gamma e^2 \{ \alpha^2 + 0.5^2(\dot{\theta}_p)^2 + (e + \dot{\theta}_r)^2 + [\Psi_1^{-1}(2\delta)]^2 + 1 \}. \quad (3.7)$$

本文设计的控制器只含有一个自适应参数, 自适应速度大大提高. 当要改变控制精度时, 只需调整两个常数, 在实际应用中很容易实现, 现给出如下定理及其证明.

**定理 3.1** 若系统的输出是有界的, 且满足假设 2.1, 2.2, 2.3, 则式 (3.5), (3.6) 和 (3.7) 给出的自适应控制器能保证跟踪误差是一致有界的, 并且只要选取恰当的参数  $\sigma$  和  $\Gamma$ , 就能使跟踪误差任意小.

证 考虑以下的 Lyapunov 函数

$$V = e^2 + 100\Gamma^{-1}(\beta - \beta^*)^2, \quad (3.8)$$

其中,  $\beta^* > 1$  为常数, 即  $\beta$  的理想值, 当  $\beta = \beta^*$  时, 系统具有理想的性能.

对  $V$  沿  $t$  求导, 得到如下所示的表达式

$$\dot{V} = 2e \cdot \dot{e} + 200\Gamma^{-1}(\beta - \beta^*)\dot{\beta}. \quad (3.9)$$

将 (3.4) 式代入 (3.9) 式有

$$\dot{V} = 2e[f(\dot{\theta}_p) - 100e + 100u - \ddot{\theta}_r + \Delta(\dot{\theta}_p, \omega) + d(t)] + 200\Gamma^{-1}(\beta - \beta^*)\dot{\beta}. \quad (3.10)$$

将(2.5)式代入(3.10)式有

$$\begin{aligned}\dot{V} \leq & -200e^2 - 200(\beta^* - 1)e^2 \left\{ \left[ \bar{f}_1(\dot{\theta}_p) \right]^2 + \left\| e + \dot{\theta}_r \right\|^2 + [\Psi_1^{-1}(2\delta)]^2 + 1 \right\} \\ & + 2|e|[\theta \cdot f_1(\dot{\theta}_p) + c_1] \left\| e + \dot{\theta}_r \right\| + c_2 \|\omega\| - |\ddot{\theta}_r| + |d(t)| \\ & - 100\sigma\beta^2 + 100\sigma\beta^{*2} - 100\sigma(\beta - \beta^*)^2.\end{aligned}\quad (3.11)$$

由(2.7)式和(3.2)式可得

$$\begin{aligned}2c_2|e|\|\omega\| &\leq 2c_2|e|\Psi_1^{-1}(\delta(t) + D(t)) \\ &\leq 2c_2|e|\Psi_1^{-1}(2\delta(t)) + 2c_2|e|\Psi_1^{-1}(2D(t)).\end{aligned}\quad (3.12)$$

已知  $\forall t \geq T^0$ ,  $D(t) = 0$ . 有  $\forall t \geq T^0$ ,  $2c_2\Psi_1^{-1}(2D(t)) = 0$ , 令  $c_3 = \sup\{|\ddot{\theta}_r| + |d(t)| + 2c_2\Psi_1^{-1}(2D(t))\}$ .

由(3.12)式和  $c_3$  可得

$$\begin{aligned}\dot{V} \leq & -200e^2 - 200(\beta^* - 1) \left( |e| \bar{f}_1(\theta_p) - \frac{\theta}{200(\beta^* - 1)} \right)^2 + \frac{\theta^2}{200(\beta^* - 1)} \\ & - 200(\beta^* - 1) \left( |e| \left\| e + \dot{\theta}_r \right\| - \frac{c_1}{200(\beta^* - 1)} \right)^2 + \frac{c_1^2}{200(\beta^* - 1)} \\ & - 200(\beta^* - 1) \left( |e| \Psi_1^{-1}(2\delta) - \frac{c_2}{200(\beta^* - 1)} \right)^2 + \frac{c_2^2}{200(\beta^* - 1)} \\ & - 200(\beta^* - 1) \left( |e| - \frac{c_3}{200(\beta^* - 1)} \right)^2 + \frac{c_3^2}{200(\beta^* - 1)} \\ & - 100\sigma\beta^2 - 100\sigma(\beta - \beta^*)^2 + 100\sigma\beta^{*2}.\end{aligned}\quad (3.13)$$

即有

$$\dot{V} \leq -200e^2 - 100\sigma(\beta - \beta^*)^2 + M_1. \quad (3.14)$$

其中  $M_1$  的表达式可以表示为如下  $M_1 = [\frac{1}{(200(\beta^* - 1))}] (c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 + \theta^2) + 100\sigma\beta^{*2}$ ,  $M_1$  为一个常数. 所以, 整个系统的 Lyapunov 函数有

$$\dot{V} \leq -\mu V + M_1, \quad (3.15)$$

其中,  $\mu = \min\{400, \sigma\Gamma\}$ , 所以函数  $V(e, \beta)$  是单调递减直到  $(e, \beta)$  到达一紧集  $C_s = \{(e, \beta) \in R \times R : V(e, \beta) \leq \mu^{-1}M_1\}$ , 这表明  $(e, \beta)$  是一致有界的. 因此选择合适的参数  $\sigma$  和  $\Gamma$ , 可以使跟踪误差  $e$  任意小.

#### 4 仿真实例

运用 Matlab 对 LAMOST 望远镜方位轴跟踪系统的模型进行仿真实验, 设参考信号  $\dot{\theta}_r = \sin(400 \cdot t)$ ,  $\alpha = 2$ , 初值  $e(0) = 1$ ,  $\beta = 10$ ,  $\dot{\theta}_r(0) = 1$ . 未建模动态表示为  $\dot{\omega} = -\omega + (\dot{\theta}_p)^2 + 0.5$ ,  $c_0 = 1.2$ ,  $d_0 = 0.625$ , 引入的动态信号表示为  $\dot{\delta} = -1.2\delta + 2.5\|\dot{\theta}_p\|^4 + 0.625$ .

当有界扰动为单位阶跃信号  $d(t) = 1(t)$  时, 取参数  $\sigma = 10^{-5}$ ,  $\Gamma = 10^3$ , 得到跟踪误差  $e_1$  仿真如图 2 所示. 取参数  $\sigma = 10^{-8}$ ,  $\Gamma = 10^5$ , 得到跟踪误差  $e_2$  和自适应参数  $\beta$  的仿真结果分别如图 3, 图 4 所示.

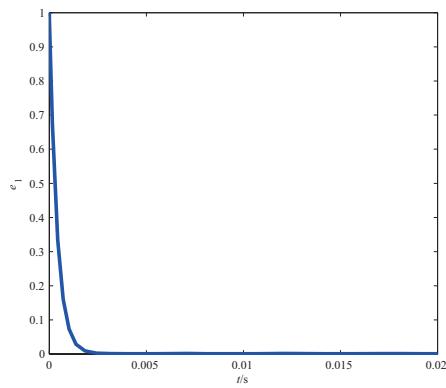


图 2 跟踪误差  $e_1$  ( $\sigma = 10^{-5}$ ,  $\Gamma = 10^3$ )  
(Figure 2 Tracking error  $e_1$  ( $\sigma = 10^{-5}$ ,  $\Gamma = 10^3$ ))

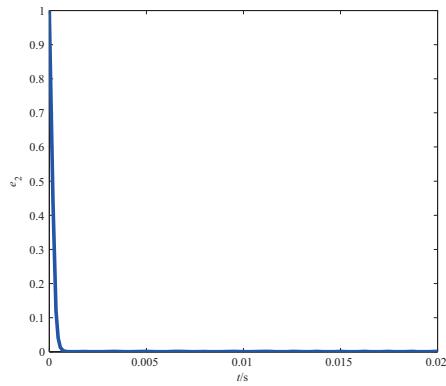


图 3 跟踪误差  $e_2$  ( $\sigma = 10^{-8}$ ,  $\Gamma = 10^5$ )  
(Figure 3 Tracking error  $e_2$  ( $\sigma = 10^{-8}$ ,  $\Gamma = 10^5$ ))

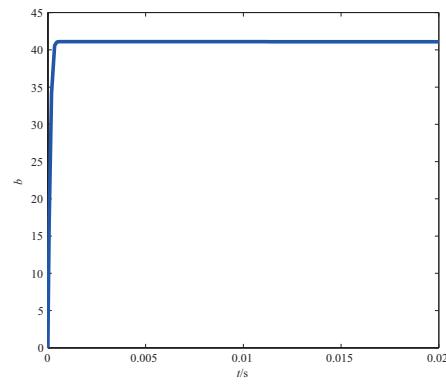


图 4 自适应参数  $\beta$  ( $\sigma = 10^{-8}$ ,  $\Gamma = 10^5$ )  
(Figure 4 Adaptive parameter  $\beta$  ( $\sigma = 10^{-8}$ ,  $\Gamma = 10^5$ ))

当有界扰动为周期信号  $d(t) = \sin(t)$  时, 取参数  $\sigma = 10^{-5}$ ,  $\Gamma = 10^3$  时, 得到跟踪误差  $e_3$  仿真如图 5 所示. 取参数  $\sigma = 10^{-8}$ ,  $\Gamma = 10^5$  时, 得到跟踪误差  $e_4$  仿真如图 6 所示, 并且得出跟踪参考信号的对比仿真图如图 7 所示.

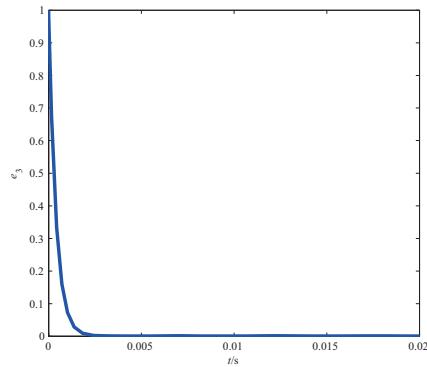


图 5 跟踪误差  $e_3$  ( $\sigma = 10^{-5}$ ,  $\Gamma = 10^3$ )  
(Figure 5 Tracking error  $e_3$  ( $\sigma = 10^{-5}$ ,  $\Gamma = 10^3$ ))

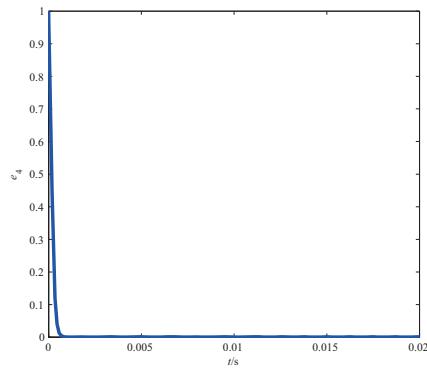


图 6 跟踪误差  $e_4$  ( $\sigma = 10^{-8}$ ,  $\Gamma = 10^5$ )  
(Figure 6 Tracking error  $e_4$  ( $\sigma = 10^{-8}$ ,  $\Gamma = 10^5$ ))

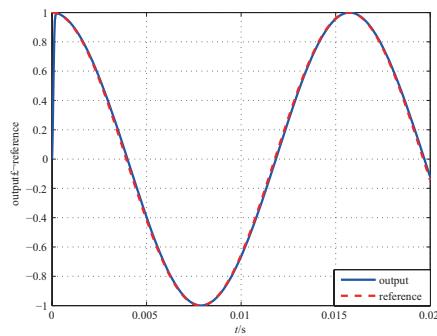


图 7 输出信号  $\dot{\theta}_p$ - 实线和参考信号  $\dot{\theta}_r$ - 点划线  
(Figure 7 Output signal  $\dot{\theta}_p$ -solid line and reference signal  $\dot{\theta}_r$ -dotted line)

从图 2 和图 3 的仿真结果可以看出, 当选择合适的参数  $\sigma$  和  $\Gamma$ , 可以使跟踪误差  $e$  任意小。从图 2 和图 5, 图 3 和图 6 的对比结果中可以看出, 不论是单位阶跃信号还是周期信号, 跟踪误差都能达到要求, 从图 7 的仿真结果可以看出, 该鲁棒自适应控制器能够迅速跟踪参考信号, 在 0.02s 内可以满足跟踪精度的要求, 且在 0.02s 内跟踪误差绝对值可减小到 0.0001''。

## 5 结 论

本文借鉴 LAMOST 望远镜模型提出鲁棒自适应控制方法, 尤其适用于南极大型望远镜含有未建模动态的非线性系统, 采用自适应阻尼抑制各种不确定性。该方法不要求估计系统中的未知参数, 能保证闭环系统的信号有界, 且具有良好的鲁棒性。此外, 通过选择合适的参数, 可以使跟踪误差任意小, 仿真结果表明所提出方法的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] Lin W, Qin C J. Adaptive control of nonlinearly parameterized systems: A nonsmooth feedback framework. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2002, **47**(5): 757–774.
- [2] 刘德馨. 非线性系统多模型自适应控制方法研究. 博士论文, 北京科技大学, 2014.  
(Liu D X. Research of multiple models adaptive control of nonlinear system. Doctoral Dissertation, University of Science and Technology, 2014.)
- [3] 郭涛, 王魏. 自适应控制方法研究与发展. 安阳师范学院学报, 2009, **39**(5): 81–84.  
(Guo T, Wang W. The research and development on adaptive control method. *Journal of Anyang Normal University*, 2009, **39**(5): 81–84.)
- [4] 袁艳芳, 张曦, 张京军, 等. 风力发电机变桨系统非线性自适应鲁棒控制. 水力发电, 2016, **42**(9): 104–107.  
(Yuan Y F, Zhang X, Zhang J J, et al. Nonlinear adaptive robust control of wind turbine for pitch system. *Water Power*, 2016, **42**(9): 104–107.)
- [5] 满永超, 刘允刚. 高阶不确定非线性系统线性状态反馈自适应控制设计. 自动化学报, 2014, **40**(9): 24–32.  
(Man Y C, Liu Y G. Adaptive control design via linear state-feedback for high-order uncertain nonlinear systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(9): 24–32.)
- [6] 姜钟平, 黄捷. 基于非线性反馈的镇定和输出调节: 简要综述. 自动化学报, 2013, **39**(9): 1389–1401.  
(Jiang Z P, Huang J. Stabilization and output regulation by nonlinear feedback: A brief overview. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(9): 1389–1401.)
- [7] 董文瀚, 孙秀霞, 林岩, 等. 一类直接模型参考 Backstepping 自适应控制. 控制与决策, 2008, **23**(9): 981–986.  
(Dong W H, Sun X X, Lin Y, et al. Direct model reference Backstepping adaptive control. *Control and Decision*, 2008, **23**(9): 981–986.)
- [8] 彭昕. 具有未建模动态系统的自适应控制. 硕士论文, 西南交通大学, 2010.  
(Peng X. Adaptive control of system with theory, design and application. Master Thesis, Southwest Jiaotong University, 2010.)
- [9] 那婧, 杨光宇, 高贯斌, 等. 基于参数估计误差的鲁棒自适应律设计及验证. 控制理论与应用, 2016, **33**(7): 956–964.  
(Na J, Yang G Y, Gao G B, et al. Parameter estimation error based robust adaptive law design and experiments. *Control Theory & Applications*, 2016, **33**(7): 956–964.)

- [10] 季海波, 陈作贤. 具有动态不确定的非线性系统的鲁棒自适应输出调节. 中国科学技术大学学报, 2008, **38**(7): 835–840.  
(Ji H B, Chen Z X. Robust adaptive output regulation for nonlinear systems with dynamic uncertainties. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2008, **38**(7): 835–840.)
- [11] 胡学妹, 刘玉生. 非线性关联大系统的鲁棒自适应观测器设计. 信息与控制, 2010, **39**(6): 707–713.  
(Hu X S, Liu Y S. Design of adaptive observe for nonlinear large-scale systems. *Information and Control*, 2010, **39**(6): 707–713.)
- [12] Chen T S, Huang J. A small gain approach to global stabilization of nonlinear feedforward systems with input unmodeled dynamics. *Automatica*, 2010, **46**(6): 1028–1034.
- [13] 杨强, 刘玉生. 不确定非线性系统的鲁棒自适应输出反馈控制. 控制与决策, 2015, **30**(6): 993–999.  
(Yang Q, Liu Y S. Robust adaptive output feedback control for uncertain nonlinear systems. *Control and Design*, 2015, **30**(6): 993–999.)
- [14] Liu Y S, Li X Y. Decentralized robust adaptive control of nonlinear systems with unmodeled dynamics. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2002, **47**(5): 848–856.
- [15] Liu Y S, Li X Y. Robust adaptive control of nonlinear systems represented by input-output models. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2003, **48**(6): 1041–1045.
- [16] 刘玉生, 陈江, 李兴源. 含未建模动态的非线性参数系统的鲁棒自适应控制. 四川大学学报, 2005, **37**(5): 148–153.  
(Liu Y S, Chen J, Li X Y. Robust adaptive control of nonlinearly parameterized systems with unmodeled dynamics. *Journal of Science and University*, 2005, **37**(5): 148–153.)
- [17] 何建民, 孙德敏. LAMOST 望远镜跟踪伺服系统模型参考自适应控制仿真研究. 中国控制会议, 1996, 1269–1272.  
(He J M, Sun D M, Simulation research of LAMOST tracking servo system on model reference adaptive control. Chinese Control Conference, 1996, 1269–1272.)
- [18] 陈江, 刘玉生, 潘玉珠. 带有未建模动态的光学跟踪望远镜的鲁棒自适应控制. 四川大学学报, 2004, **36**(3): 89–92.  
(Chen J, Liu Y S, Pan Y Z. Robust adaptive control for optical tracking telescope with unmodeled dynamics. *Journal of Science and University*, 2004, **36**(3): 89–92.)
- [19] Jiang Z P, Praly L. Design of robust adaptive controllers for nonlinear systems with dynamic uncertainties. *Automatica*, 1998, **34**(7): 825–840.
- [20] Lin W, Pongvuthithum R. Adaptive output tracking of inherently nonlinear systems with nonlinear parameterization. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2003, **48**(10): 1737–1749.