

文章编号 1672-6634(2024)05-0008-10

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024040013

一类输出受限机械系统的鲁棒自适应容错跟踪

任世纪¹, 孙宗耀¹, 赵军圣²

(1. 曲阜师范大学 自动化研究所, 山东 曲阜 273165; 2. 聊城大学 数学科学学院, 山东 聊城 252059)

摘要 研究了一类输出受限机械系统的鲁棒自适应容错跟踪控制问题。借助动态面控制(DSC)技术和时变尺度函数,设计了一个基于神经网络的状态反馈控制器,确保系统在遭受非匹配扰动和非仿射非线性执行器故障的情况下,输出信号满足预设的时变约束,并且跟踪误差在预设的时刻之前进入原点的任意预设的小邻域,同时也解决了传统反步法中虚拟控制器需要被多次求导的问题。本文的创新点在于放宽了对时变约束函数的要求,并且在时变因素存在的情况下阐明了神经网络逼近的紧集和闭环信号的有界性之间的逻辑关系。最后通过仿真验证了控制策略的有效性。

关键词 鲁棒自适应; 执行器故障; 输出约束; 神经网络

中图分类号 O231

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Robust Adaptive Fault-Tolerant Tracking for a Class of Mechanical Systems with Output Constraints

REN Shiji¹, SUN Zongyao¹, ZHAO Junsheng²

(1. Institute of Automation, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. School of Mathematical Sciences, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract This paper investigates the issue of robust adaptive fault-tolerant tracking control for a class of mechanical systems with output constraints. With the aid of the dynamic surface control (DSC) technology and scaling time-varying functions, a state feedback controller based on neural networks is presented. In the presence of unmatched disturbances and non-affine nonlinear actuator faults, the controller ensures that the system satisfies the predetermined time-varying output constraints and the tracking error enters any predetermined small neighborhood of the origin before the predetermined time, while solving the problem that virtual controllers need to be differentiated many times in traditional backstepping methods. The innovation lies in relaxing the requirement for the time-varying constraint functions and clarifying the logical relationship between the compactness of neural networks approximation and the boundedness of closed-loop signals in the presence of time-varying factors. Finally, the simulation is provided to demonstrate the

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173208); 山东省泰山学者项目(tsqn202103061)资助

通信作者: 孙宗耀, 男, 汉族, 博士, 教授, 山东省泰山学者青年专家, 研究方向: 非线性系统控制、自适应理论和时滞系统, E-mail: sunzongyao@sohu.com。

efficiency of the proposed method.

Key words robust adaptive; actuator faults; output constraints; neural networks

0 引言

相比于线性系统,非线性系统能够更加有效地描述和建模实际生活中的动力学行为,因此非线性控制已经成为了控制领域的一个研究热点^[1]。受部件磨损老化等因素的影响,实际系统可能会发生未知故障,这些故障会使系统的性能恶化,甚至造成安全隐患。为了减轻或消除未知故障对系统的不良影响,保证系统的正常运行,近些年来,非线性系统的容错控制问题受到了越来越多的关注^[2-6]。本文考虑一类实际动态机械系统的输出受限容错跟踪控制问题。如图1所示,该系统由一个倒立摆,一个硬化弹簧和一辆小车构成,倒立摆由一个长度为 l 的无质量杆和一个质量为 m 的小球组成,此小球通过硬化弹簧与位于水平面上的小车连接,小车内的电机可以控制小车的速度。由于材质老化等因素,硬化弹簧的性能发生了潜在的恶化,其弹力 F_s 和形变量 Δ 之间的关系被表示为 $F_s = K[\Delta]^{p(t)}$,其中 $K \geq 0$ 为劲度系数,未知连续函数 $p(t) \in [1, \bar{p}]$ 反映了硬化弹簧性能恶化的具体情况, $\bar{p}$ 为已知常数, $[\cdot]^{p(t)} = |\cdot|^{p(t)} \text{sign}(\cdot)$, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。初始时刻 t_0 时,硬化弹簧处于自由状态。将小车的速度 $v(t)$ 和无质量杆与竖直面之间的夹角 $\vartheta(t) \in (-0.5\pi, 0.5\pi)$ 分别作为系统的输入和输出,考虑到小球会受到无质量杆切线方向上空气阻力 $F(t)$ 的影响,并且小车的电机可能会发生故障,根据牛顿第二定律,此机械系统的动力学方程为

$$\begin{cases} ml\ddot{\vartheta}(t) = mg \sin \vartheta(t) + K[\lambda(t) - l \sin \vartheta(t)]^{p(t)} \cos \vartheta(t) - F(t), \\ \dot{\lambda}(t) = v(t) + \tau(t)\omega(v(t)), \end{cases} \quad (1)$$

式中 $|F(t)| \leq D$, D 为一个未知正常数, g 为重力加速度,未知局部利普希茨连续函数 ω 刻画了电机发生的非仿射非线性故障对小车速度造成的影响,连续函数 τ 反映了电机发生故障的时刻,其被定义为:

$$\tau(t) = \begin{cases} 0, & t_0 \leq t \leq T_0, \\ 1 - \exp(-b(t - T_0)), & t > T_0, \end{cases}$$

式中 $T_0 \geq t_0$ 和 b 为正常数。

未知时变幂次的存在使得这类系统具有严重的非线性和不确定性,因此其控制问题具有一定的挑战性。近些年来,这类系统的控制问题受到了相当多的关注^[7-9]。具体来说,在不考虑非匹配扰动和执行器故障的情况下,文献[7]给出了这类系统的全局镇定和实际跟踪控制策略。在存在状态时滞的情况下,文献[8]采用动态增益的方法解决了这类系统的实际跟踪问题。文献[9]研究了这类系统在遭受线性执行器故障时的容错跟踪问题。值得注意的是,文献[7-9]只研究了这类系

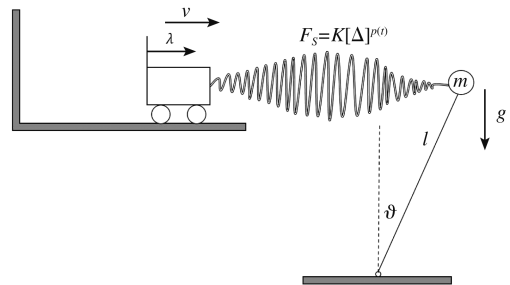


图1 一类输出受限的机械系统

Fig. 1 A class of output-constrained mechanical systems

统的渐近行为。然而能够实现有限时间状态收敛的系统通常表现出更好的鲁棒性,更快的收敛速度和更高的控制精度,因此近年来非线性系统的有限时间控制问题吸引了研究者的广泛关注^[10-15]。为了解决有限时间控制中驻留时间依赖于初始状态的问题,文献[6]将文献[16]中固定时间实际稳定性的相关理论引入到高阶非线性系统的容错控制中。遗憾的是,虽然固定时间控制^[16,17]中的驻留时间可以通过一些设计参数进行调节,但这些参数往往被限制在一定的范围内,这就导致了驻留时间不能被任意预先设定。另一方面,文献[7-9]均没有考虑这类机械系统的时变输出约束问题^[18-21],同时在控制器的设计过程中虚拟控制器需要被多次求导。众所周知,DSC技术^[22]已经成为了避免反步法中虚拟控制器被多次求导的重要工具,并已应用于多种非线性系统^[6,9-12]。然而,DSC技术在时变幂次高阶非线性系统中的应用还没有得到充分的研究。

综上所述,现有的方法不能有效地减轻或消除未知非仿射非线性执行器故障对系统(1)造成的影响,而

且不能使跟踪误差在预设的时间内达到一定的精度。鉴于此,本文对下面的问题进行研究:如何设计一个状态反馈控制器使得具有时变输出约束和非线性非仿射执行器故障的机械系统(1)的跟踪误差在一个任意设定的时间内进入原点的一个任意设定的邻域。为了解决这一问题,本文应用神经网络逼近和 DSC 技术提出了一种新的控制设计策略,该策略包含以下三个方面的技术创新:(1)与有关机械系统(1)的文献[7-9]相比,本文同时考虑了未知非匹配扰动和非仿射非线性执行器故障对机械系统(1)造成的影响。此外,与文献[4-6]中有限时间和固定时间的实际跟踪不同,本文中的驻留时间和跟踪精度都可以任意预先设定,不受初始状态和设计参数的影响。(2)利用参数分离技术^[23],神经网络中的变量被尽可能地减少,从而简化了控制器的结构,并且减弱了文献[5,6]中对跟踪信号的限制条件。同时在由跟踪信号,非匹配扰动,执行器故障和时变尺度函数造成的时变因素存在的情况下,构造了神经网络逼近所在的紧集,并系统地阐述了它与闭环信号有界性之间的逻辑关系。(3)不同于文献[18-21]至少要求时变约束函数本身及其一阶和二阶导数连续且有界,本文只要求时变约束函数具有连续可微性即可,这在一定程度上扩大了控制器的适用范围。另外,通过引入时变增益滤波器,DSC 技术被改进以适用于时变幂次高阶非线性系统。这避免了文献[7-9]中虚拟控制需要被多次求导的问题,简化了控制器设计的计算过程。

本文采用如下符号: $\mathbf{R}$ 表示全体实数的集合, $\mathbf{R}^n$ 表示 n 维的欧几里德空间, $\mathbf{R}_{\text{odd}}^{\geq 1} = \{q_1/q_2: q_1 \text{ 和 } q_2 \text{ 为正奇整数且 } q_1 \geq q_2\}$ 。对于一个实值向量 $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_n]^T \in \mathbf{R}^n$, $\bar{\mathbf{w}}_i = [w_1, \dots, w_i]^T, i=1, \dots, n$ 。为了表达的简洁性,在不引起混淆时,函数的变量可以简化或省略,例如 $h(\mathbf{x}(t))$ 可以被表示为 $h(\mathbf{x})$, $h(\cdot)$ 或 h 。

1 控制目标与预备知识

本文的控制目标是:对于给定的机械系统(1)和满足 $|y_d(t)| + |\dot{y}_d(t)| \leq Y$ 的连续可微跟踪信号 $y_d(t)$, 其中 Y 是一个未知正常数,设计一个容错控制器使得:(1)闭环系统的所有信号在 $[t_0, +\infty)$ 上是一致有界的。(2)系统(1)的输出 $\vartheta(t)$ 满足时变非对称输出约束

$$-L_1(t) + y_d(t) < \vartheta(t) < L_2(t) + y_d(t), \forall t \geq t_0, \quad (2)$$

式中时变约束函数 $L_j(t) \geq L, j=1,2$ 为任意给定的定义在 $[t_0, +\infty)$ 上的连续可微函数, L 为一个任意小的正常数。(3)跟踪误差 $e_1(t) = \vartheta(t) - y_d(t)$ 满足 $|e_1(t)| \leq \kappa, \forall t \geq T$, 其中常数 $\kappa > 0$ 和 $T \geq t_0$ 可以任意预先设定。下面给出本文需要用到的几条重要引理。

引理1^[7] 对于 $\forall t \geq 0$ 和 $\forall k \geq 0$, 如果连续函数 $f(t), a(t), b(t)$ 满足 $0 \leq a(t) \leq f(t) \leq b(t)$, 则 $k^{f(t)} \leq k^{a(t)} + k^{b(t)}$ 。

引理2^[7] 对于任意给定的连续正函数 $f(t)$ 和正常数 $k_i, i=1,2,\dots,m$, 不等式成立

$$\sum_{i=1}^m |k_i|^{f(t)} \leq \left(\sum_{i=1}^m |k_i|\right)^{f(t)} \leq m^{f(t)-1} \sum_{i=1}^m |k_i|^{f(t)}, \forall t \geq 0.$$

引理3^[7] 设 $d \geq 1$ 是一个常数, $c(t)$ 是一个连续函数并且满足 $1 \leq c(t) \leq d$, 则对于 $\forall t \geq 0$ 和 $\forall k > 0$, 不等式成立 $k(k^{-1} + k^{-\frac{1}{d}})^{c(t)} \geq 1$ 。

引理4^[7] 设 $f(t) \geq 1$ 是一个连续函数, 对于 $\forall c \in \mathbf{R}, \forall d \in \mathbf{R}$ 和 $\forall t \geq 0$, 下面的不等式成立

$$|[c]^{f(t)} - [d]^{f(t)}| \leq |c - d|^{f(t)} + f(t) |c - d| (|c|^{f(t)-1} + |d|^{f(t)-1}).$$

引理5^[23] 对于任意的实值连续函数 $f(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2), \mathbf{k}_1 \in \mathbf{R}^m, \mathbf{k}_2 \in \mathbf{R}^n$, 存在光滑的标量值函数 $c(\mathbf{k}_1) \geq 1$ 和 $d(\mathbf{k}_2) \geq 1$ 使得 $|f(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)| \leq c(\mathbf{k}_1)d(\mathbf{k}_2)$ 。

引理6^[24] 设 f_1 和 f_2 为正常数, $c(k, l)$ 和 $d(k, l)$ 为连续正函数, 则对任意的 $\forall k \in \mathbf{R}$ 和 $\forall l \in \mathbf{R}$, 不等式成立

$$c(k, l) |k|^{f_1} |l|^{f_2} \leq d(k, l) |k|^{f_1+f_2} + \frac{f_2}{f_1+f_2} \left(\frac{f_1}{(f_1+f_2)d(k, l)} \right)^{\frac{f_1}{f_2}} c^{\frac{f_1+f_2}{f_2}}(k, l) |l|^{f_1+f_2}.$$

引理7^[25] 对于任意一个定义在紧集 $\Pi \subseteq \mathbf{R}^m$ 上的连续函数 $f(\mathbf{X})$, 存在一个径向基函数神经网络

$R(\mathbf{X}) = \boldsymbol{\zeta}^T \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{X})$ 使得 $f(\mathbf{X}) = \boldsymbol{\zeta}^{*T} \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{X}) + \varepsilon(\mathbf{X})$, $|\varepsilon(\mathbf{X})| \leq \hat{\varepsilon}, \forall \mathbf{X} \in \Pi$, 式中 $\boldsymbol{\Psi}(\mathbf{X}) = [\psi_1, \dots, \psi_k]^T$ 是一个基函数向量, $\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1, \dots, \zeta_k]^T \in \mathbf{R}^k$ 是权值向量, k 是神经网络节点的数量; $\varepsilon(\mathbf{X})$ 是逼近误差, $\hat{\varepsilon} \geq 0$ 是 $\varepsilon(\mathbf{X})$ 的上界, $\boldsymbol{\zeta}^* = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{\zeta} \in \mathbf{R}^k} \{ \sup_{\mathbf{X} \in \Pi} |f(\mathbf{X}) - \boldsymbol{\zeta}^T \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{X})| \}$ 是理想权值向量; 对每一个 $i = 1, \dots, k$, 基函数 ψ_i 被选择为高斯函数 $\exp(-(\mathbf{X} - \boldsymbol{\varphi}_i)^T(\mathbf{X} - \boldsymbol{\varphi}_i)/\eta_i^2)$, $\boldsymbol{\varphi}_i = [\varphi_{i1}, \dots, \varphi_{im}]^T$ 为第 i 个隐层神经元的中心点矢量值, η_i 为第 i 个隐层神经元的高斯函数的宽度。

2 控制器设计

首先, 定义 $x_1 = \vartheta, x_2 = \dot{\vartheta}, x_3 = \lambda - l \sin \vartheta, u = v$, 方程(1)可以被转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = a(x_1(t)) [x_3(t)]^{p(t)} + h_2(x_1(t)) - F(t), \\ \dot{x}_3(t) = u(t) + h_3(x_1(t), x_2(t)) + \tau(t) \omega(u(t)), \end{cases} \quad (3)$$

式中 $a(x_1) = K \cos(x_1), h_2(x_1) = mg \sin(x_1), h_3(x_1, x_2) = -lx_2 \cos(x_1)$ 。

然后, 引入如下的坐标变换

$$\begin{cases} \xi_1(t) = \frac{e_1(t)}{(E_1(t) + e_1(t))(E_2(t) - e_1(t))}, \\ \xi_i(t) = x_i(t) - z_i(t), i = 2, 3, \end{cases} \quad (4)$$

式中时变尺度函数 $E_j, j = 1, 2$ 被定义为:

$$E_j(t) = \begin{cases} (L_j(t) - \rho) \left(\frac{t - t_0}{T - t_0} - 1 \right)^2 + \rho, t_0 \leq t \leq T, \\ \rho, t > T, \end{cases} \quad (5)$$

z_i 是时变增益滤波器

$$\boldsymbol{\zeta}_i(\bar{\mathbf{x}}_i(t), \bar{\boldsymbol{\theta}}_i(t), \bar{\mathbf{S}}_i(t)) \dot{z}_i(t) + z_i(t) = \alpha_{i-1}(\bar{\mathbf{x}}_{i-1}(t), \bar{\boldsymbol{\theta}}_{i-1}(t), \bar{\mathbf{S}}_{i-1}(t), y_d(t), \mathbf{E}(t)) \quad (6)$$

的输出信号, $\rho \leq \min\{L, \kappa\}$ 是一个设计参数, $\mathbf{E} = [E_1, E_2]^T, \alpha_{i-1}(\cdot)$ 是虚拟控制器, $\boldsymbol{\zeta}_i(\cdot)$ 是待确定的光滑函数, $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3$ 分别是下面定义的未知正常数 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的估计值, $S_1 = 0, S_i = z_i - \alpha_{i-1}$ 。很明显, 由式(5)可知存在已知正常数 $\hat{E}$ 使得

$$|\dot{E}_j| \leq \hat{E}, \forall t \geq t_0, j = 1, 2. \quad (7)$$

第1步: 本步设计虚拟控制器 α_1 , 引入函数 $V_1(t, x_1, \hat{\theta}_1) = \frac{1}{2} \xi_1^2 + \frac{\sigma_1}{2} \tilde{\theta}_1^2$, 式中 σ_1 是一个正设计参数,

$\tilde{\theta}_1(t) = \theta_1 - \hat{\theta}_1(t)$, 由式(3), (4)可知

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -\xi_1^2 + M(e_1, \mathbf{E}) \xi_1 x_2 - \sigma_1 \tilde{\theta}_1 \dot{\hat{\theta}}_1 - M(e_1, \mathbf{E}) \xi_1 \dot{y}_d + M(e_1, \mathbf{E}) N_1(e_1, \mathbf{E}) \dot{E}_1 \xi_1 \\ & + M(e_1, \mathbf{E}) N_2(e_1, \mathbf{E}) \dot{E}_2 \xi_1, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $M(\cdot) = \frac{e_1^2 + E_1 E_2}{(E_1 + e_1)^2 (E_2 - e_1)^2}$, $N_1(\cdot) = \frac{e_1^2 - e_1 E_2}{e_1^2 + E_1 E_2}$, $N_2(\cdot) = -\frac{e_1^2 + e_1 E_1}{e_1^2 + E_1 E_2}$ 。由引理6和式(7)得出

$$-M \xi_1 \dot{y}_d \leq \theta_1 M^2 \xi_1^2 + \frac{1}{4}, MN_1 \dot{E}_1 \xi_1 \leq M^2 \xi_1^2 N_1^2 \hat{E}_1^2 + \frac{1}{4}, MN_2 \dot{E}_2 \xi_1 \leq M^2 \xi_1^2 N_2^2 \hat{E}_2^2 + \frac{1}{4}, \quad (9)$$

式中 $\theta_1 = Y^2$ 是一个未知正常数。将式(9)代入式(8)中可以得到

$$\dot{V}_1 = -\xi_1^2 + M \xi_1 (\alpha_1 + \hat{\theta}_1 M \xi_1 + M \xi_1 N_1^2 \hat{E}_1^2 + M \xi_1 N_2^2 \hat{E}_2^2 + \frac{\xi_1}{M} + x_2 - \alpha_1) + \tilde{\theta}_1 (M^2 \xi_1^2 - \sigma_1 \dot{\hat{\theta}}_1) + \frac{3}{4}.$$

取自适应律 $\dot{\hat{\theta}}_1$ 和虚拟控制器 α_1 为

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = \frac{1}{\sigma_1} M^2 \xi_1^2 - \eta_1 \hat{\theta}_1, \alpha_1 = -\hat{\theta}_1 M \xi_1 - M \xi_1 N_1^2 \hat{E}_1^2 - M \xi_1 N_2^2 \hat{E}_2^2 - \frac{\xi_1}{M}, \quad (10)$$

则可以得到

$$\dot{V}_1 \leq -\xi_1^2 - \frac{\sigma_1 \eta_1}{2} \tilde{\theta}_1^2 + M \xi_1 (x_2 - \alpha_1) + H_1, \quad (11)$$

式中 $H_1 = \frac{3}{4} + \frac{\sigma_1 \eta_1}{2} \theta_1^2 > 0$ 。

第2步: 本步设计虚拟控制器 $\alpha_2(\cdot) = -\beta(\mathbf{x}_1, \bar{\boldsymbol{\theta}}_2, S_2, y_d, \mathbf{E})(\xi_2 + \xi_2^{\hat{p}})$, 式中 $\beta(\cdot)$ 是一个待设计的光滑函数, $\hat{p} \geq \bar{p}$ 为已知常数且 $\hat{p} \in \mathbf{R}_{\text{odd}}^{\geq 1}$ 。引入函数 $V_2(t, \bar{\mathbf{x}}_2, \bar{\boldsymbol{\theta}}_2, S_2) = V_1 + \frac{1}{\hat{p}+1} \xi_2^{\hat{p}+1} + \frac{\sigma_2}{2} \tilde{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} S_2^2$, 式中 $\tilde{\theta}_2(t) = \theta_2 - \hat{\theta}_2(t)$ 。由式(11)不难推出

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -\xi_1^2 - \frac{\sigma_1 \eta_1}{2} \tilde{\theta}_1^2 + H_1 - \frac{S_2^2}{\zeta_2} - \sigma_2 \tilde{\theta}_2 \dot{\hat{\theta}}_2 + \xi_2^{\hat{p}} a([x_3]^{p(t)} - [\alpha_2]^{p(t)}) + \xi_2^{\hat{p}} a[\alpha_2]^{p(t)} \\ & + \frac{\xi_2^{\hat{p}} S_2}{\zeta_2} + \xi_2^{\hat{p}} h_2 + \xi_2^{\hat{p}} F - S_2 \dot{\alpha}_1(\bar{\mathbf{x}}_2, \hat{\theta}_1, \tilde{\mathbf{y}}_d, \tilde{\mathbf{E}}) + M \xi_1 (x_2 - \alpha_1), \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $\tilde{\mathbf{y}}_d = [y_d, \dot{y}_d]^T$, $\tilde{\mathbf{E}} = [E_1, E_2, \dot{E}_1, \dot{E}_2]^T$; $\dot{\alpha}_1(\cdot) = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}_1} \dot{\hat{\theta}}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_d} \dot{y}_d + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial E_j} \dot{E}_j$ 是一个连续函数。接下来对式(12)的后六项进行估计。根据引理1~3可以推出

$$\xi_2^{\hat{p}} a[\alpha_2]^{p(t)} = \xi_2^{\hat{p}} a[-\beta(\xi_2 + \xi_2^{\hat{p}})]^{p(t)} \leq -\left(\frac{\beta}{a}\right)^{p(t)} (|\xi_2|^{\hat{p}+p(t)} + |\xi_2|^{\hat{p}+\hat{p}p(t)}) \leq -\xi_2^{2\hat{p}} \left(\frac{\beta}{a}\right)^{p(t)}, \quad (13)$$

式中 $\tilde{a} = \tilde{a}^{-1} + \tilde{a}^{-\frac{1}{p}}$, $\tilde{a} \leq a(x_1)$ 是一个正常数。利用引理6可以得到

$$\frac{\xi_2^{\hat{p}} S_2}{\zeta_2} \leq \frac{\xi_2^{2\hat{p}} S_2^2}{\zeta_2^2} + \frac{1}{4}, \xi_2^{\hat{p}} h_2 \leq \xi_2^{2\hat{p}} h_2^2 + \frac{1}{4}, \xi_2^{\hat{p}} F \leq \theta_2 \xi_2^{2\hat{p}} + \frac{1}{4}, \quad (14)$$

式中 $\theta_2 = D^2$ 是一个未知正常数。当 $\bar{\mathbf{x}}_2$ 和 $\hat{\theta}_1$ 位于式(31)中定义的紧集 Ξ_2 中时, 根据 $\tilde{\mathbf{y}}_d$ 和 $\tilde{\mathbf{E}}$ 的有界性, 并利用引理6, 不难得出

$$S_2 \dot{\alpha}_1 \leq \mu_2 S_2^2 + \frac{\Lambda_2}{4\mu_2}, \quad (15)$$

式中 μ_2 为一个正设计参数, $\Lambda_2 \geq \dot{\alpha}_1^2$ 是一个未知正常数。由引理6和式(6)可知

$$M \xi_1 (x_2 - \alpha_1) = M \xi_1 \xi_2 + M \xi_1 S_2 \leq M^{2\hat{p}} \xi_1^{2\hat{p}} \xi_2^{2\hat{p}} + M^2 \xi_1^2 S_2^2 + \frac{1}{4} + \frac{2\hat{p}-1}{2\hat{p}} \left(\frac{1}{2\hat{p}}\right)^{\frac{1}{2\hat{p}-1}}. \quad (16)$$

将式(13)~(16)代入式(12), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -\xi_1^2 - \xi_2^{2\hat{p}} + \frac{\sigma_1 \eta_1}{2} \tilde{\theta}_1^2 + \xi_2^{\hat{p}} a([x_3]^{p(t)} - [\alpha_2]^{p(t)}) + S_2^2 (M^2 \xi_1^2 + \mu_2 - \frac{1}{\zeta_2}) - \tilde{\theta}_2 (\xi_2^{2\hat{p}} - \sigma_2 \dot{\hat{\theta}}_2) \\ & - \xi_2^{2\hat{p}} \left(\frac{\beta}{a}\right)^{p(t)} + \xi_2^{2\hat{p}} (1 + M^{2\hat{p}} \xi_1^{2\hat{p}} + h_2^2 + (\hat{\theta}_2^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \frac{S_2^2}{\zeta_2^2})^{p(t)} + \hat{H}_2, \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $\hat{H}_2 = H_1 + 2 + \frac{2\hat{p}-1}{2\hat{p}} \left(\frac{1}{2\hat{p}}\right)^{\frac{1}{2\hat{p}-1}} + \frac{\Lambda_2}{4\mu_2}$ 。通过选择

$$\zeta_2 = \frac{1}{M^2 \xi_1^2 + \mu_2 + q_2}, \dot{\hat{\theta}}_2 = \frac{1}{\sigma_2} \xi_2^{2\hat{p}} - \eta_2 \hat{\theta}_2, \beta = \tilde{a} (1 + M^{2\hat{p}} \xi_1^{2\hat{p}} + h_2^2 + (\hat{\theta}_2^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \frac{S_2^2}{\zeta_2^2}), \quad (18)$$

可以得到

$$\dot{V}_2 \leq -\xi_1^2 - \xi_2^{2\hat{p}} + \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_i \eta_i}{2} \tilde{\theta}_i^2 + q_2 S_2^2 + \xi_2^{\hat{p}} a([x_3]^{p(t)} - [\alpha_2]^{p(t)}) + H_2, \quad (19)$$

式中 q_2 和 η_2 为正设计参数, $H_2 = \hat{H}_2 + \frac{\sigma_2 \eta_2}{2} \theta_2^2$ 。

第3步:本步处理非仿射非线性故障并且设计控制器 $u(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3, y_d, \mathbf{E})$, $\mathbf{x} = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T$ 。为此,选择候选李雅普诺夫函数 $V_3(t, \mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3) = V_2 + \frac{1}{2}\xi_3^2 + \frac{\sigma_3}{2}\tilde{\theta}_3^2 + \frac{1}{2}S_3^2$, 式中 $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_3(t) = \boldsymbol{\theta}_3 - \hat{\boldsymbol{\theta}}_3(t)$, 对其进行求导,结合式(19)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -\xi_1^2 - \xi_2^{2\hat{p}} + \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_i \eta_i}{2} \tilde{\theta}_i^2 + q_2 S_2^2 + H_2 - \frac{S_3^2}{\zeta_3} - \sigma_3 \tilde{\theta}_3 \dot{\theta}_3 + \xi_3 u + \xi_3 h_2 + \frac{\xi_3 S_3}{\zeta_3} \\ & + \xi_3 \tau \omega - S_3 \dot{\alpha}_2(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_2, \mathbf{S}_2, \tilde{\mathbf{y}}_d, \tilde{\mathbf{E}}, p, F) + \xi_3^{\hat{p}} a([\mathbf{x}_3]^{p(t)} - [\alpha_2]^{p(t)}), \end{aligned} \quad (20)$$

式中 $\dot{\alpha}_2(\cdot) = \sum_{i=1}^2 \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_i} \dot{x}_i + \sum_{i=1}^2 \frac{\partial \alpha_i}{\partial \theta_i} \dot{\theta}_i + \frac{\partial \alpha_1}{\partial S_2} \dot{S}_2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_d} \dot{y}_d + \sum_{j=1}^2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial E_j} \dot{E}_j$ 是一个连续函数。下面对式(20)不等号右边的后四项进行估计,利用引理6,不难推出

$$\frac{\xi_3 S_3}{\zeta_3} \leq \frac{\xi_3^2 S_3^2}{\zeta_3^2} + \frac{1}{4}, \xi_3 \tau \omega \leq \xi_3^2 \tau^2 \omega^2 + \frac{1}{4} \leq \xi_3^2 \omega^2 + \frac{1}{4}, \quad (21)$$

根据引理5和 $y_d, \mathbf{E}$ 的有界性,存在光滑函数 $\bar{\omega}(y_d, \mathbf{E}) \geq 1$ 和 $\hat{\omega}(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3) \geq 1$ 使得

$$\omega^2(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3) \leq \bar{\omega}(y_d, \mathbf{E}) \hat{\omega}(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3) \leq \Theta \hat{\omega}(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3), \quad (22)$$

式中 $\Theta \geq 1$ 是一个未知常数。由引理7可知,存在定义在紧集 Ξ_2 上的一个径向基函数神经网络使得

$$\Theta \hat{\omega}(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3) = \boldsymbol{\zeta}_3^{*T} \boldsymbol{\Psi}_3(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3) + \epsilon_3(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3), \quad |\epsilon_3(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3)| \leq \hat{\epsilon}_3, \quad (23)$$

式中 $\boldsymbol{\zeta}_3^*$ 为理想权值向量, $\boldsymbol{\Psi}_3(\cdot)$ 为基函数向量, $\hat{\epsilon}_3$ 为逼近误差 $\epsilon_3(\cdot)$ 的上界。根据式(21)~(23)可知

$$\xi_3 \tau \omega \leq \theta_3 \xi_3^2 \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_3, \bar{\mathbf{S}}_3) + \frac{1}{4}, \quad (24)$$

式中 $\theta_3 = \max\{\|\boldsymbol{\zeta}_3^*\|, \hat{\epsilon}_3\}$ 为一个未知正常数, $\boldsymbol{\Phi}(\cdot) \geq \|\boldsymbol{\Psi}_3(\cdot)\| + 1$ 为一个已知光滑函数。由于 $\tilde{\mathbf{y}}_d, \tilde{\mathbf{E}}, p$ 和 F 是有界的,则当 $\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_2$ 和 S_2 在紧集 Ξ_2 中时,根据引理6,不难得出

$$S_3 \dot{\alpha}_2 \leq \mu_3 S_3^2 + \frac{\Lambda_3}{4\mu_3}, \quad (25)$$

式中 μ_3 为一个正设计参数, $\Lambda_3 \geq \dot{\alpha}_2^2$ 是一个未知正常数。由引理1,4,6可以得出

$$\begin{aligned} \xi_3^{\hat{p}} a([\mathbf{x}_3]^{p(t)} - [\alpha_2]^{p(t)}) & \leq |\xi_3^{\hat{p}} a| (1 + (\mathbf{x}_3 - \alpha_2)^{\hat{p}-1} + \hat{p}(2 + \mathbf{x}_3^{\hat{p}-1} + \alpha_2^{\hat{p}-1})) (|\xi_3| + |S_3|) \\ & \leq \Gamma(\mathbf{x}, \bar{\boldsymbol{\theta}}_2, S_2, y_d, \mathbf{E}) (\xi_3^2 + S_3^2) + \frac{1}{2}, \end{aligned} \quad (26)$$

式中 $\Gamma(\cdot) = \xi_3^2 \hat{p}^2 a^2 (1 + (\mathbf{x}_3 - \alpha_2)^{\hat{p}-1} + \hat{p}(2 + \mathbf{x}_3^{\hat{p}-1} + \alpha_2^{\hat{p}-1}))^2$ 。将式(21),式(24)~(26)代入式(20),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -\xi_1^2 - \xi_2^{2\hat{p}} - \xi_3^2 + \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_i \eta_i}{2} \tilde{\theta}_i^2 + q_2 S_2^2 + S_3^2 (\Gamma + \mu_3 - \frac{1}{\zeta_3}) - \tilde{\theta}_3 (\xi_3^2 \boldsymbol{\Phi} - \sigma_3 \dot{\theta}_3) \\ & + \xi_3 (u + \xi_3 + \Gamma \xi_3 + h_3 + \hat{\theta}_3 \xi_3 \boldsymbol{\Phi} + \frac{\xi_3 S_3^2}{\zeta_3^2}) + \hat{H}_3, \end{aligned}$$

式中 $\hat{H}_3 = H_2 + 1 + \frac{\Lambda_3}{4\mu_3}$ 。选择光滑函数 v_3 , 自适应律 $\dot{\hat{\theta}}_3$ 和控制器 u 为

$$\zeta_3 = \frac{1}{\Gamma + \mu_3 + q_3}, \dot{\hat{\theta}}_3 = \frac{1}{\sigma_3} \xi_3^2 \boldsymbol{\Phi} - \eta_3 \hat{\theta}_3, u = -\xi_3 - \Gamma \xi_3 - h_3 - \hat{\theta}_3 \xi_3 \boldsymbol{\Phi} - \frac{\xi_3 S_3^2}{\zeta_3^2}, \quad (27)$$

则可以得到

$$\dot{V}_3 \leq -\xi_1^2 - \xi_2^{2\hat{p}} - \xi_3^2 + \sum_{i=1}^3 \frac{\sigma_i \eta_i}{2} \tilde{\theta}_i^2 - \sum_{i=2}^3 q_i S_i^2 + H_3, \quad (28)$$

式中 $H_3 = \hat{H}_3 + \frac{\sigma_3 \eta_3}{2} \theta_3^2$ 。

3 主要结果

定理1 如果连续可微的跟踪信号 y_d 和其导数 $\dot{y}_d$ 均是有界的,任意给定的函数 $L_j(t) \geq L, j=1,2$, 是可微的,其中 L 为一个任意小的正常数,则对于满足 $y_d(t_0) - L_1(t_0) < x_1(t_0) < y_d(t_0) + L_2(t_0)$ 的 $x(t_0) \in \mathbf{R}^3$,式(27)中的控制器可以确保系统(1)满足:(1) 对于 $\forall t \geq t_0$,所有闭环信号是一致有界的,并且时变非对称输出约束(3)不会被违反。(2) 对于任意预设的时刻 $T \geq t_0$ 和正常数 κ ,跟踪误差满足 $|e_1(t)| \leq \kappa, \forall t > T$ 。

证明 首先定义闭环系统为 $\dot{\mathbf{B}}(t) = \boldsymbol{\varphi}(t, \mathbf{B}(t))$, 其中 $\mathbf{B}(t) = [\mathbf{x}^T(t), \bar{\boldsymbol{\theta}}_3^T, S_2, S_3]^T$, 很明显 $\boldsymbol{\varphi}(t, \mathbf{B}(t))$ 关于 $\mathbf{B}(t)$ 是局部利普希茨的,并且关于 t 是连续的。根据解的存在唯一性定理, $\mathbf{B}(t)$ 在区间 $[t_0, t_f)$ 上有定义, t_f 为有限值或正无穷。然后定义两个紧集 Ξ_1 和 Ξ_2 。由引理1可知

$$-\xi_2^{2\hat{p}} \leq -\frac{1}{\hat{p}+1} \xi_2^{\hat{p}+1} + (2\hat{p})^{\frac{2\hat{p}}{1-\hat{p}}} \frac{\hat{p}-1}{\hat{p}+1}, \quad (29)$$

将式(29)代入式(28)可得

$$\dot{V}_3 \leq -\omega_1 V_3 + \omega_2, \quad (30)$$

式中 $\omega_1 = \min_{n=1,2,3} \{2, \eta_i, q_i\}, \omega_2 = (2\hat{p})^{\frac{2\hat{p}}{1-\hat{p}}} \frac{\hat{p}-1}{\hat{p}+1} + H_3$ 。构造如下两个闭集合

$$\begin{cases} \Xi_1 = \{\mathbf{B}(t) \in \mathbf{R}^8 : V_3(t, \mathbf{B}(t)) \leq R_1, t_0 \leq t \leq t_f\}, \\ \Xi_2 = \{\mathbf{B}(t) \in \mathbf{R}^8 : V_3(t, \mathbf{B}(t)) \leq R_2, t_0 \leq t \leq t_f\}, \end{cases} \quad (31)$$

式中 R_1 和 R_2 是两个正常数且满足 $\omega_2/\omega_1 + V_3(t_0, \mathbf{B}(t_0)) \leq R_1 < R_2$ 。很明显, Ξ_1 完全位于 Ξ_2 的内部。由 $V_3(t, \mathbf{B}(t))$ 的定义可知:当 $\|\mathbf{B}(t)\| \rightarrow \infty$ 时,有 $V_3(t, \mathbf{B}(t)) \rightarrow \infty$ 。这说明 Ξ_1 和 Ξ_2 是有界的,则 Ξ_1 和 Ξ_2 都是紧集。

另一方面,当 $x_1(t) \in \Pi_1 = \{x_1(t) \in \mathbf{R} : -E_1(t) + y_d(t) < x_1(t) < E_2(t) + y_d(t), t_0 \leq t < t_f\}$ 时,由于 $M(e_1, \mathbf{E}) > 0$, 则 ξ_1 关于 e_1 是单调递增的,结合(4)式可知当且仅当 $e_1(t) \rightarrow -E_1(t)$ 或 $e_2(t) \rightarrow E_2(t)$ 时有 $\xi_1(t) \rightarrow \infty$ 。又知状态变量 $x_1(t)$ 关于时间 t 是连续的,因此当 $t_0 \leq t < t_f$ 且 $x_1(t_0) \in \Pi_1$ 时,只要 ξ_1 是有界的,则存在一个集合

$$\Pi_2 = \{x_1(t) \in \mathbf{R} : -E_a(t) + y_d(t) < x_1(t) < E_b(t) + y_d(t), t_0 \leq t < t_f\} \subseteq \Pi_1, \quad (32)$$

式中 $0 < E_a(t) < E_1(t), 0 < E_b(t) < E_2(t)$,使得

$$x_1(t) \in \Pi_2. \quad (33)$$

(1) 接下来在 $t \in [t_0, t_f)$ 时进行分析。由式(30)可知

$$V_3(t, \mathbf{B}(t)) \leq \frac{\omega_2}{\omega_1} + (V_3(t_0, \mathbf{B}(t_0)) - \frac{\omega_2}{\omega_1}) e^{-\omega_1(t-t_0)} \leq \frac{\omega_2}{\omega_1} + V_3(t_0, \mathbf{B}(t_0)) \leq R_1 < R_2, \quad (34)$$

则 $\mathbf{B}(t) \in \Xi_1 \subseteq \Xi_2$, 所以利用神经网络对 Ξ_2 上任意未知连续函数的逼近是有效的。另外式(34)还说明:对每一个 $i=1,2,3, \xi_i, \bar{\theta}_i$ 和 S_i 是有界的,则 $\hat{\theta}_i = \theta_i - \bar{\theta}_i$ 也是有界的。按照式(33)的分析方式,由 ξ_1 的有界性和 $y_d(t_0) - L_1(t_0) < x_1(t_0) < y_d(t_0) + L_2(t_0)$ 即 $x_1(t_0) \in \Pi_1$ 可知:存在由式(32)式定义的集合 Π_2 使得 $x_1(t) \in \Pi_2$, 则 $x_1(t)$ 和 M 是有界的。由 $x_1, \hat{\theta}_1, y_d$ 和 $\mathbf{E}$ 的有界性和 $\alpha_1(x_1, \hat{\theta}_1, y_d, \mathbf{E})$ 的连续性可知 α_1 是有界的,则 $z_2 = S_2 + \alpha_1$ 和 $x_2 = \xi_2 + z_2$ 也是有界的。同样地,可以递推地得出 $\alpha_2, \nu_2, x_3, \nu_3, u$ 的有界性。下面我们利用反证法证明 $t_f = +\infty$ 。假设 t_f 为有限值,则 t_f 是一个有限逃逸时间,所以当 $t \rightarrow t_f$ 时, $x_i(t) \rightarrow \infty, i=1,2,3$ 或者 $u(t) \rightarrow \infty$,这与 $x_i(t), i=1,2,3$ 和 $u(t)$ 在 $[t_0, t_f)$ 上的有界性矛盾,因此 $t_f = +\infty$ 。

(2) 对于 $\forall t \geq t_0$,由 $x_1(t) \in \Pi_2 \subseteq \Pi_1$ 可知 $-E_1(t) < \vartheta(t) - y_d(t) < E_2(t)$ 。结合 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 的定义,不难得出对于任意的时刻 $T \geq t_0$ 和任意小的正常数 κ ,不等式成立

$$|e_1(t)| = |\vartheta(t) - y_d(t)| \leq \kappa, \forall t > T.$$

4 仿真

给定机械系统(1)的参数如: $m=1$ kg, $l=1$ m, $K=15$ N/m, $g=9.8$ m/s²。假设 $p(t)=0.1 \sin(t)+2$, $F(t)=0.1 \sin^2(t)$, $L_1(t)=0.6 \sin(t)+0.8$, $L_2(t)=0.6 \cos(t)+0.8$, $b=50$, $T_0=1.5$, $\omega(v)=\cos(v)+100v$ 。跟踪信号被选择为 $y_d(t)=0.15 \sin(2t-2)$ 。

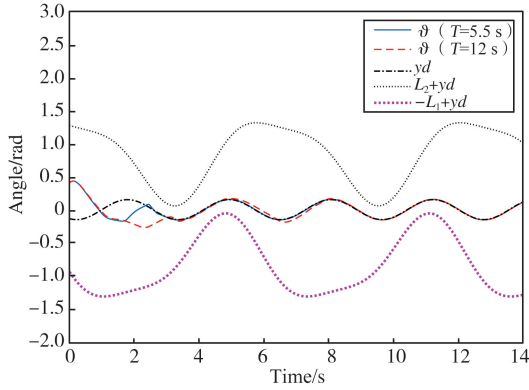


图2 ϑ 和 y_d 的轨迹

Fig. 2 Trajectories of ϑ and y_d

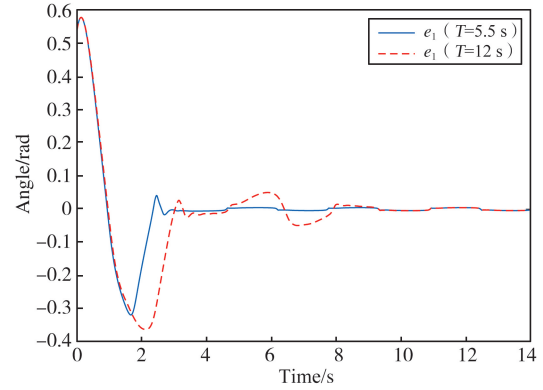


图3 e_1 的轨迹

Fig. 3 Trajectories of e_1

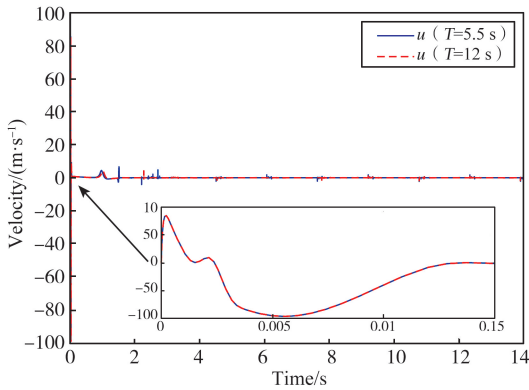


图4 u 的轨迹

Fig. 4 Trajectories of u

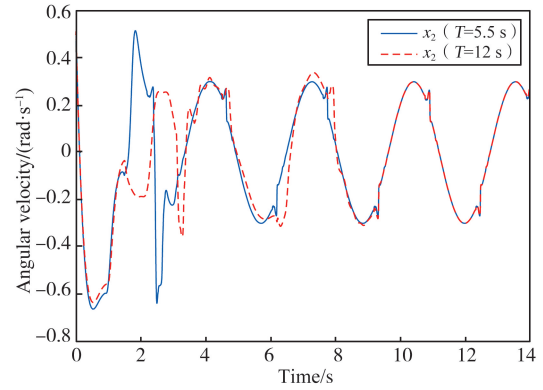


图5 x_2 的轨迹

Fig. 5 Trajectories of x_2

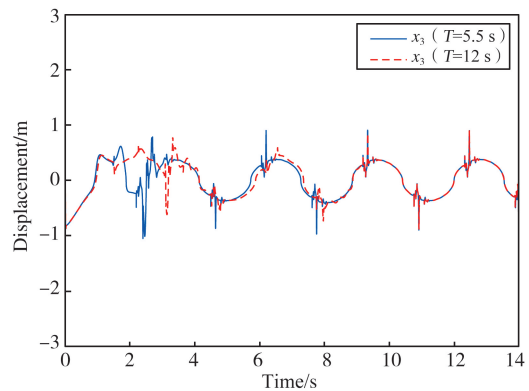


图6 x_3 的轨迹

Fig. 6 Trajectories of x_3

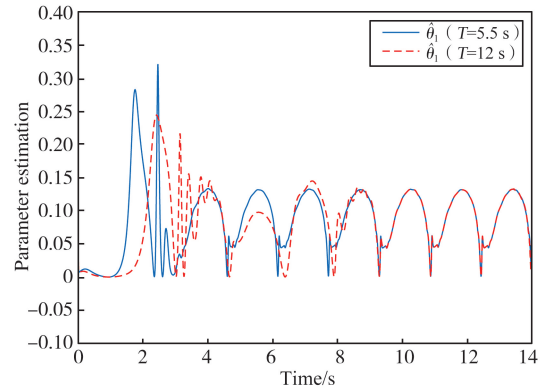
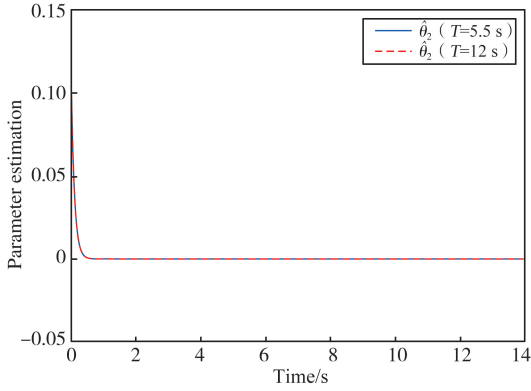
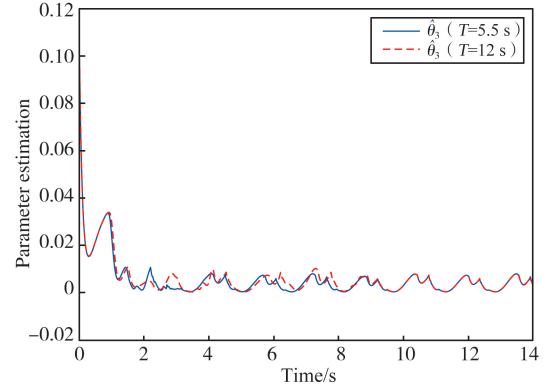
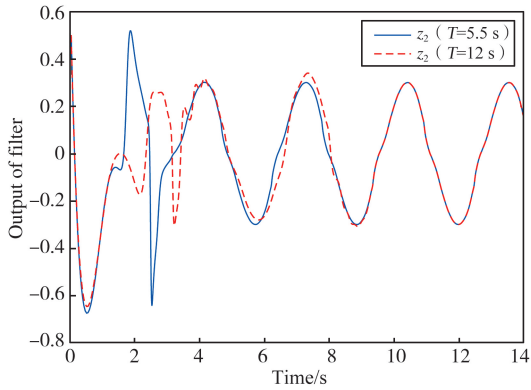
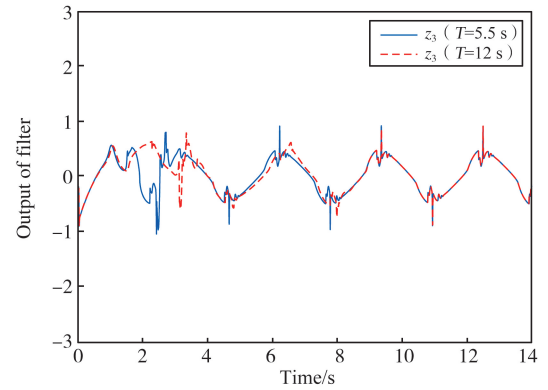


图7 $\hat{\theta}_1$ 的轨迹

Fig. 7 Trajectories of $\hat{\theta}_1$

考虑 $T=5.5$ s 和 $T=12$ s 两种情况,应用第二部分中式(10),式(18)和式(27)所设计的控制器,自

适应律和滤波器,并选择设计参数为 $\hat{p}=3, q_2=3, q_3=\mu_3=200, \kappa=0.21, \eta_1=200, \sigma_2=\sigma_3=1, \eta_2=\eta_3=10, \hat{E}=1.5, a=2$ 。

图 8 θ_2 的轨迹Fig. 8 Trajectories of $\hat{\theta}_2$ 图 9 θ_3 的轨迹Fig. 9 Trajectories of $\hat{\theta}_3$ 图 10 z_2 的轨迹Fig. 10 Trajectories of z_2 图 11 z_3 的轨迹Fig. 11 Trajectories of z_3

选择函数 $\Phi(X)$ 为 $\Phi(X) = \|\Psi_3(X)\| + 1, X = [x^T, \bar{\theta}_3^T, S_2, S_3]^T$, 其中 $\Psi_3(X) = [\psi_1(X), \dots, \psi_{11}(X)]^T, \psi_i(X) = \exp(-0.5(X - \varphi_i)^T(X - \varphi_i)), \varphi_i = [\varphi_{i1}, \dots, \varphi_{i8}]^T, \varphi_{ij} = 2.5 - 0.5(i-1), i=1, \dots, 11, j=1, \dots, 8$; 选择初始值为 $x_1(0)=0.4, x_2(0)=0.5, x_3(0)=-0.3, \hat{\theta}_1(0)=0.2, \hat{\theta}_2(0)=0.1, \hat{\theta}_3(0)=0.1, S_2(0)=0.5, S_3(0)=-0.3$ 。

图 2~6 给出了仿真结果(1) 图 2~3 展示了即使系统遭受未知的非仿射非线性执行器故障和非匹配扰动, ϑ 也能在预先设定的时间 T 之前跟踪上 y_d , 并满足预先设定的时变约束。(2) 图 4~11 说明系统的所有闭环信号均是有界的。

5 结论

本文研究了一类输出受约束的动态机械系统的基于神经网络逼近和 DSC 技术的鲁棒自适应容错跟踪控制问题。在存在未知非匹配扰动和非仿射非线性执行器故障的情况下,所设计的控制器不仅能够保证所有闭环信号有界,输出信号满足预设的时变约束,而且能够使跟踪误差在任意预设的时刻之前达到任意预设的精度,同时也解决了传统反步法中虚拟控制器需要被多次求导的问题。

参 考 文 献

- [1] KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

- [2] LI Y X, YANG G H. Fuzzy adaptive output feedback fault-tolerant tracking control of a class of uncertain nonlinear systems with non-affine nonlinear faults[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 24(1): 223-234.
- [3] ZHANG J X, YANG G H. Robust adaptive fault-tolerant control for a class of unknown nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(1): 585-594.
- [4] WANG H, LIU P X, ZHAO X, et al. Adaptive fuzzy finite-time control of nonlinear systems with actuator faults[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 50(5): 1786-1797.
- [5] SUN K, LIU L, QIU J, et al. Fuzzy adaptive finite-time fault-tolerant control for strict-feedback nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 29(4): 786-796.
- [6] BAI Y, SUN Z Y, CHEN C C, et al. Fuzzy fixed-time fault-tolerant control of uncertain nonlinear systems with non-affine faults and its application in manipulator systems[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2024, 26(2): 540-552.
- [7] MAN Y, LIU Y. Global adaptive stabilization and practical tracking for nonlinear systems with unknown powers[J]. Automatica, 2019, 100: 171-181.
- [8] LIU Z G, XUE L, SUN Z Y. A new robust adaptive tracking strategy to uncertain time-delay nonlinear systems with a general form[J]. Automatica, 2022, 146: 110560.
- [9] YOO S J. Simplified global fault accommodation control design of uncertain nonlinear systems with unknown time-varying powers[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 99(2): 1115-1128.
- [10] HONG Y, WANG J, CHENG D. Adaptive finite-time control of nonlinear systems with parametric uncertainty[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(5): 858-862.
- [11] SUN Z Y, YUN M M, LI T. A new approach to fast global finite-time stabilization of high-order nonlinear system[J]. Automatica, 2017, 81: 455-463.
- [12] SUN Z Y, SHAO Y, CHEN C C. Fast finite-time stability and its application in adaptive control of high-order nonlinear system[J]. Automatica, 2019, 106: 339-348.
- [13] SUN Z Y, PENG Y, WEN C, et al. Fast finite-time adaptive stabilization of high-order uncertain nonlinear system with an asymmetric output constraint[J]. Automatica, 2020, 121: 109170.
- [14] 赵军圣, 赵雪静, 孙宗耀. 随机非线性系统的有限时间命令滤波输出反馈跟踪控制[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2023, 36(6): 9-17.
- [15] 谢仕培, 孙伟. 单连杆柔性关节机械臂的高阶滑模控制器设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 9-18.
- [16] JIANG B, HU Q, FRISWELL M I. Fixed-time attitude control for rigid spacecraft with actuator saturation and faults[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5): 1892-1898.
- [17] CHEN C C, SUN Z Y. Fixed-time stabilization of high-order nonlinear systems with an asymmetric output constraint[J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111(1): 319-339.
- [18] TEE K P, REN B, GE S S. Control of nonlinear systems with time-varying output constraints[J]. Automatica, 2011, 47(11): 2511-2516.
- [19] ZHAO K, SONG Y. Removing the feasibility conditions imposed on tracking control designs for state-constrained strict-feedback systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 64(3): 1265-1272.
- [20] LING S, WANG H, LIU P X. Adaptive tracking control of high-order nonlinear systems under asymmetric output constraint[J]. Automatica, 2020, 122: 109281.
- [21] FU L, MA R, PANG H, et al. Predefined-time tracking of nonlinear strict-feedback systems with time-varying output constraints[J]. Journal of the Franklin Institute, 2022, 359(8): 3492-3516.
- [22] SWAROOP D, 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.
- [23] LIN W, QIAN C. Adaptive control of nonlinearly parameterized systems: a nonsmooth feedback framework[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(5): 757-774.
- [24] QIAN C, LIN W. Non-Lipschitz continuous stabilizers for nonlinear systems with uncontrollable unstable linearization[J]. Systems Control Letters, 2001, 42(3): 185-200.
- [25] WANG L X, MENDEL J M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1992, 3(5): 807-814.

(责任编辑:刘庆松)