

控制与决策

Control and Decision

带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制

陈强, 丁科新, 南余荣

引用本文:

陈强, 丁科新, 南余荣. 带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 387–394.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种改进的紧格式无模型自适应控制方法

An improved compact form model free adaptive control method

控制与决策. 2021, 36(2): 436–442 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0635>

空间机器人捕获航天器操作的避撞柔顺复合自抗扰控制

Collision avoidance and compliant composite active disturbance rejection control of space robot capture spacecraft

控制与决策. 2021, 36(2): 355–362 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0507>

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization

控制与决策. 2021, 36(1): 97–104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制

陈 强, 丁科新, 南余荣[†]

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘 要: 针对带有输出约束和模型不确定的柔性关节机械臂系统, 提出一种基于时变障碍李雅普诺夫函数的预设性能自适应控制方法. 通过构造指数衰减的时变约束边界, 提出时变正切型障碍李雅普诺夫函数, 能够同时适用于约束与非约束情况, 进而拓宽传统对数型障碍李雅普诺夫函数的适用范围. 此外, 通过预先设置时变边界函数的相关参数, 使得系统输出在初始阶段具有较小的超调量和较快的跟踪速度, 并能够满足系统的稳态性能要求. 在此基础上, 结合反演法设计反馈控制律, 保证系统的输出约束性能和轨迹跟踪精度. 最后, 基于李雅普诺夫稳定性定理证明所有闭环信号能够达到一致最终有界, 并给出数值仿真对比验证所提出方法的有效性.

关键词: 自适应控制; 神经网络; 预设性能; 柔性关节机械臂

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0974

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 陈强, 丁科新, 南余荣. 带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 387-394.

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

CHEN Qiang, DING Ke-xin, NAN Yu-rong[†]

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In this paper, an adaptive prescribed performance control scheme is proposed based on time-varying barrier Lyapunov function for flexible-joint manipulator systems with output constraints and model uncertainties. A time-varying tangent barrier Lyapunov function is first presented by constructing a time-varying constrained boundary which attenuates exponentially, and it extends the application scope of the conventional logarithmic barrier Lyapunov functions. In addition, by presetting the parameters of the time-varying boundary function, the system output has the smaller overshoot and faster tracking speed in the initial stage, and the satisfactory steady-state performance can be guaranteed simultaneously. Then, the feedback control law is designed by employing the backstepping technique to ensure the output constraints and the trajectory tracking accuracy. All the closed-loop signals are proved to be uniformly ultimately bounded through using the Lyapunov stability theorem, and numerical simulations are given to show the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: adaptive control; neural networks; prescribed performance; flexible-joint manipulators

0 引 言

随着科技的发展, 机械臂被广泛应用于工业生产、医疗、服务业等领域^[1-2]. 机械臂主要分为刚性机械臂、柔性关节机械臂和柔性臂杆机械臂等^[3]. 相较于刚性机械臂, 柔性关节机械臂由于具有重量轻、灵活度高、能耗低等特点, 在医疗、航天、反恐排爆等领域发挥着重要作用^[4-5]. 然而, 柔性关节机械臂在关节处使用谐波齿轮减速器和力矩传感器等柔性器件, 使得柔性关节机械臂的轨迹跟踪控制问题变得较为困

难^[6-7]. 因此, 研究柔性关节机械臂的轨迹跟踪控制问题具有实际意义.

文献[8-9]较早地针对柔性关节机械臂轨迹跟踪控制问题进行了研究, 并设计自适应控制器, 实现柔性关节机械臂轨迹跟踪. 文献[10]针对柔性关节机械臂, 提出了一种基于 Takagi-Sugeno 模糊建模和并行分布补偿的直接模型参考自适应控制方法, 保证柔性关节机械臂轨迹跟踪性能. 文献[11]提出了一种动态面自适应控制方法, 并简化控制器设计, 提高

收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2019-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61973274); 浙江省自然科学基金项目(LY17F030018, LY20E070007).

责任编辑: 王燕舞.

[†]通讯作者. E-mail: nyr@zjut.edu.cn.

了柔性关节机械臂位置跟踪精度. 文献[12]提出了一种鲁棒最优的柔性关节机械臂干扰观测器设计方法, 获得最佳的干扰抑制性能, 保证柔性关节机械臂轨迹跟踪性能. 文献[13]针对带有模型不确定性的柔性关节机械臂, 设计模糊自适应控制器, 实现柔性关节机械臂轨迹跟踪控制, 同时增强了系统的鲁棒性能. 以上文献主要致力于提高柔性关节机械臂位置跟踪的稳态精度, 却较少考虑其瞬态响应和输出约束问题.

为了保证柔性关节机械臂系统的瞬态性能和稳定性, 在控制律设计过程中通常需要考虑系统输出约束对系统性能的影响. 常用的输出约束方法有预设性能控制^[14-17]、Funnel控制方法^[18-20]和障碍李雅普诺夫函数^[21-22]等. 其中: 文献[14-17]将受约束的误差变量转换为不受约束的变量, 利用转换后不受约束的变量构造李雅普诺夫函数和设计控制器, 实现了系统的预设性能控制. 文献[23]针对带有输出约束的柔性关节机械臂轨迹跟踪控制问题, 基于常值对数型障碍李雅普诺夫函数设计自适应控制器, 实现了柔性关节机械臂轨迹跟踪控制. 文献[24]构造时变对数型障碍李雅普诺夫函数, 并在此基础上设计干扰观测器估计外界干扰, 提高了机械臂系统的鲁棒性. 然而, 当约束边界趋近于无穷大时, 对数型障碍李雅普诺夫函数趋近于零. 因此, 针对此问题, 文献[25]提出正切型障碍李雅普诺夫函数, 能够将系统误差约束在常值边界内. 当约束边界趋近于无穷大时, 该正切型障碍李雅普诺夫函数可以转换为二次型函数形式, 能够同时适用于约束与非约束情况, 拓展了对数型障碍李雅普诺夫函数的适用范围. 当被控系统要求稳态误差较小时, 需要将常值约束边界设置为较小值. 然而, 若系统初始误差较大, 则常值约束边界难以同时保证系统稳态和瞬态性能.

基于以上讨论, 本文针对带有模型不确定和输出约束的柔性关节机械臂轨迹跟踪控制问题, 提出一种时变正切型障碍李雅普诺夫函数, 将系统误差约束在指数衰减的时变边界内. 通过预先设置时变边界函数的相关参数, 使得系统在控制初始阶段有较小的超调量和较快的跟踪速度, 同时能够满足系统的稳态性能要求. 此外, 与时变对数型障碍李雅普诺夫函数相比, 所提出的时变正切型障碍李雅普诺夫函数能够同时适用于约束与非约束情况, 拓展了时变对数型障碍李雅普诺夫函数的适用范围. 最后, 基于时变正切型障碍李雅普诺夫函数和反步法设计反馈控制律, 保证系统所有闭环信号能够达到一致最终有界, 并给出数

值仿真对比验证所提出方法的有效性.

1 系统描述

如图1所示, 柔性关节机械臂系统的动力学方程^[26]为

$$\begin{cases} I\ddot{q} + K(q - \theta) + MgL \sin q + \Delta_1 + d_1 = 0, \\ J\ddot{\theta} - K(q - \theta) + \Delta_2 + d_2 = \tau. \end{cases} \quad (1)$$

其中: M 、 g 、 L 分别为机械臂质量、重力加速度和机械臂长度; q 、 θ 分别为机械臂连杆和电机角度; I 、 J 分别为连杆和电机的惯量; K 为弹性系数; τ 为控制力矩; d_1 和 d_2 为有界干扰信号; Δ_1 和 Δ_2 为模型不确定部分, 有

$$\begin{cases} \Delta_1 = \Delta I\ddot{q} + \Delta MgL \sin q + \Delta K(q - \theta), \\ \Delta_2 = \Delta J\ddot{\theta} - \Delta K(q - \theta). \end{cases} \quad (2)$$

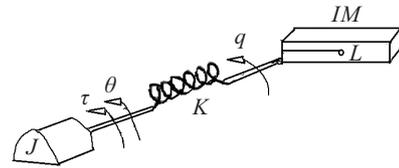


图1 柔性关节机械臂模型

定义系统状态变量 $x_1 = q$, $x_2 = \dot{q}$, $x_3 = \theta$, $x_4 = \dot{\theta}$, 则式(1)可改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{MgL}{I} \sin x_1 - \frac{K}{I}(x_1 - x_3) - \frac{\Delta_1}{I} - \frac{d_1}{I}, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{K}{J}(x_1 - x_3) + \frac{\tau}{J} - d\frac{\Delta_2}{J} - \frac{d_2}{J}, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (3)$$

其中 y 为系统输出. 为便于控制器设计, 对系统(1)作如下假设.

假设1^[27] 存在大于零的常数 $\bar{\Delta}_i$ 和 \bar{d}_i , 满足 $|\Delta_i| < \bar{\Delta}_i$, $|d_i| < \bar{d}_i$, $i = 1, 2$.

假设2^[28] 期望轨迹 y_d 及其导数连续且有界.

本文控制目标为针对带有输出约束和模型不确定的柔性关节机械臂系统(1), 设计预设性能自适应控制器, 使得机械臂输出 y 准确快速跟踪期望轨迹 y_d .

2 时变正切型障碍李雅普诺夫函数

传统的对数型障碍李雅普诺夫函数表达式^[29-30]为

$$V_{\ln} = \frac{1}{2} \ln \frac{k_b^2}{k_b^2 - e^2}. \quad (4)$$

其中: \ln 为自然对数, $k_b > 0$ 为约束边界, 误差初始值 $e(0)$ 满足 $|e(0)| < k_b$. 当 $k_b \rightarrow \infty$ 时, 有 $V_{\ln} \rightarrow 0$. 文献[25]提出一种正切型障碍李雅普诺夫函数, 表示为

$$V_{\tan} = \frac{k_b^2}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e^2}{2k_b^2}\right), \quad (5)$$

其中 $\tan(\cdot)$ 为正切函数. 由式(5)可见, 当 $k_b \rightarrow \infty$ 时, $V_{\tan} = \frac{1}{2}e^2$, 因此, 该障碍李雅普诺夫函数能够同时适用于约束与非约束($k_b \rightarrow \infty$)的情况, 进而拓展了传统对数型障碍李雅普诺夫函数的适用范围.

以上两种障碍李雅普诺夫函数均可将系统误差限定在常值边界 $\pm k_b$ 内, 当被控系统要求稳态误差较小时, 需要将常值约束边界 k_b 设置为较小值. 若系统初始误差 $e(0)$ 较大, 则常值约束边界往往难以同时保证系统稳态和瞬态性能. 因此, 提出一种时变正切型障碍李雅普诺夫函数, 表达形式为

$$V = \frac{F_1^2}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e^2}{2F_1^2}\right). \quad (6)$$

其中: e 为系统输出误差; F_1 为时变误差约束边界, 有

$$F_1 = (F_{01} - F_{\infty 1})\exp^{-a_1 t} + F_{\infty 1}, \quad (7)$$

F_{01} 为 F_1 的初始值, $F_{\infty 1}$ 为 $t \rightarrow \infty$ 时 F_1 的稳态值, a_1 为 F_1 的收敛速度, $0 < F_{\infty 1} < F_{01}$, $a_1 > 0$; 误差初始值 $e(0)$ 满足 $|e(0)| < F_{01}$.

注1 障碍李雅普诺夫函数(6)可将系统误差约束在 $\pm F_1$ 边界内. 当 F_1 趋近无穷大时, 式(6)可等价为一一般二次型形式, 即 $V = e^2/2$. 因此, 相较于现有的时变对数型障碍李雅普诺夫函数^[24], 所提出的时变正切型障碍李雅普诺夫函数能够同时适用于约束与非约束($F_1 \rightarrow \infty$)情况.

注2 约束边界 F_1 为指数衰减函数, 表达式如式(2)所示, 其中参数 F_{01} 应依据初始误差 $|e(0)|$ 的大小设置, 需满足 $|e(0)| < F_{01}$. 在控制初始阶段, 参数 a_1 的大小表征误差的收敛速度, a_1 越大误差收敛越快. 在稳态阶段, 参数 $F_{\infty 1}$ 的大小决定稳态误差边界, $F_{\infty 1}$ 越小系统稳态误差越小. 因此, 可以通过预先设定 a_1 、 F_{01} 和 $F_{\infty 1}$ 的大小同时满足稳态和瞬态性能要求.

3 控制器设计

在本节中, 针对带有输出约束和模型不确定的柔性关节机械臂系统, 设计预设性能自适应控制器, 使得柔性关节机械臂系统的输出 y 能够快速准确地跟踪期望轨迹 y_d , 控制器具体设计步骤如下.

step 1: 定义柔性关节机械臂系统的跟踪误差为

$$e_1 = y - y_d, \quad (8)$$

其中 y_d 为期望轨迹. 对 e_1 求导可得

$$\dot{e}_1 = \dot{y} - \dot{y}_d = x_2 - \dot{y}_d.$$

构造障碍李雅普诺夫函数 V_1 , 表达式为

$$V_1 = \frac{F_1^2}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right). \quad (9)$$

其中: e_1 为系统误差; F_1 为约束边界函数, 表达式如式(7)所示. 对 V_1 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{2F_1\dot{F}_1}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) + \sec^2\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) \\ &\quad e_1\left(e_2 + \alpha_1 - \dot{y}_d - e_1 \frac{\dot{F}_1}{F_1}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $e_2 = x_2 - \alpha_1$, α_1 为虚拟控制律. 由式(10)可设计 α_1 为

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \\ &\dot{y}_d + e_1 \frac{\dot{F}_1}{F_1} - (2F_1\dot{F}_1 + k_1 F_1^2) \sin\left(\frac{\pi e_1^2}{F_1^2}\right) / (2\pi e_1), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 k_1 为大于零的常数.

将式(11)代入(10), 可得

$$\dot{V}_1 = -k_1 V_1 + \sec^2\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) e_1 e_2. \quad (12)$$

step 2: 定义误差变量 e_2 为

$$e_2 = x_2 - \alpha_1. \quad (13)$$

对 e_2 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \frac{1}{I}(K e_3 + K \alpha_2 - MgL \sin(x_1) - \\ &\quad K x_1 - f_1 - d_1). \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $e_3 = x_3 - \alpha_2$, α_2 为虚拟控制律, $f_1 = \Delta_1 + I\dot{\alpha}_1$.

利用 Sigmoid 神经网络^[31]逼近 f_1 , 表示为

$$f_1 = W_1^{*T} \varphi(X_1) + \varepsilon_1^*. \quad (15)$$

其中: W_1^{*T} 为理想权值; ε_1^* 为逼近误差, 满足 $|\varepsilon_1^*| \leq \bar{\varepsilon}_1$, $\bar{\varepsilon}_1$ 为大于零的常数; $X_1 = [x_1, x_2, x_3, y_d, \dot{y}_d, \alpha_1]$ 为神经网络输入; $\varphi(X_1)$ 为神经元激励函数, 其表达式为

$$\varphi(X_1) = \frac{a}{b + \exp(-X_1/c)} + d, \quad (16)$$

a, b, c, d 为合适的参数.

设计虚拟控制律 α_2 为

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= x_1 + \frac{1}{K} \left(MgL \sin x_1 - k_2 e_2 + \right. \\ &\quad \left. \hat{W}_1^T \varphi(X_1) - \sec^2\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) e_1 \right). \end{aligned} \quad (17)$$

其中: k_2 为大于零的常数, \hat{W}_1^T 为 W_1^{*T} 的估计值.

将式(15)和(17)代入(14), 可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \frac{1}{I} \left(K e_3 - k_2 e_2 - \sec^2\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) e_1 + \right. \\ &\quad \left. \tilde{W}_1^T \varphi(X_1) - \theta_1 \right). \end{aligned} \quad (18)$$

其中: $\tilde{W}_1^T = \hat{W}_1^T - W_1^{*T}$, $\theta_1 = \varepsilon_1^* + d_1$.

构造李雅普诺夫函数 V_2 为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}Ie_2^2 + \frac{1}{2\eta_1}\tilde{W}_1^T\tilde{W}_1, \quad (19)$$

其中 η_1 为大于零的常数. 对 V_2 求导可得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + Ie_2\dot{e}_2 + \frac{1}{\eta_1}\tilde{W}_1^T\dot{\tilde{W}}_1. \quad (20)$$

将式(12)和(18)代入(20),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_1V_1 - k_2e_2^2 + Ke_2e_3 + \\ & \tilde{W}_1^T\left(e_2\varphi(X_1) + \frac{1}{\eta_1}\dot{\tilde{W}}_1\right) - e_2\theta_1. \end{aligned} \quad (21)$$

设计 \hat{W}_1^T 的自适应律为

$$\dot{\hat{W}}_1 = -\eta_1e_2\varphi(X_1) - \sigma_1\hat{W}_1, \quad (22)$$

其中 σ_1 为大于零的常数.

将式(22)代入(21),可得

$$\dot{V}_2 = -k_1V_1 - k_2e_2^2 + Ke_2e_3 - \frac{\sigma_1}{\eta_1}\tilde{W}_1^T\hat{W}_1 - e_2\theta_1. \quad (23)$$

step 3: 定义误差变量 e_3 为

$$e_3 = x_3 - \alpha_2. \quad (24)$$

对 e_3 求导,可得

$$\dot{e}_3 = e_4 + \alpha_3 - \dot{\alpha}_2, \quad (25)$$

其中: $e_4 = x_4 - \alpha_3$, α_3 为虚拟控制量. 利用神经网络逼近 $\dot{\alpha}_2$, 表示为

$$\dot{\alpha}_2 = W_2^{*T}\varphi(X_2) + \varepsilon_2^*. \quad (26)$$

其中: W_2^{*T} 为理想权值; ε_2^* 为逼近误差, 满足 $|\varepsilon_2^*| \leq \bar{\varepsilon}_2$, $\bar{\varepsilon}_2$ 为大于零的常数; $X_2 = [x_1, x_2, x_3, x_4, e_1, e_2, \alpha_2]$ 为神经网络输入.

设计虚拟控制律 α_3 为

$$\alpha_3 = \hat{W}_2^T\varphi(X_2) - Ke_2 - k_3e_3. \quad (27)$$

其中: k_3 为大于零的常数, \hat{W}_2^T 为 W_2^{*T} 的估计值.

将式(26)和(27)代入(25),可得

$$\dot{e}_3 = e_4 + \tilde{W}_2^T\varphi(X_2) - \theta_2 - k_3e_3 - Ke_2. \quad (28)$$

其中: $\tilde{W}_2^T = \hat{W}_2^T - W_2^{*T}$, $\theta_2 = \varepsilon_2^*$.

设计李雅普诺夫函数 V_3 为

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}e_3^2 + \frac{1}{2\eta_2}\tilde{W}_2^T\tilde{W}_2, \quad (29)$$

其中 η_2 为大于零的常数. 对 V_3 求导,可得

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + e_3\dot{e}_3 + \frac{1}{\eta_2}\tilde{W}_2^T\dot{\tilde{W}}_2. \quad (30)$$

将式(23)和(28)代入(30),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -k_1V_1 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 - \frac{\sigma_1}{\eta_1}\tilde{W}_1^T\hat{W}_1 + e_3e_4 + \\ & \tilde{W}_2^T\left(e_3\varphi(X_2) + \frac{1}{\eta_2}\dot{\tilde{W}}_2\right) - e_2\theta_1 - e_3\theta_2. \end{aligned} \quad (31)$$

设计 \hat{W}_2^T 的自适应律为

$$\dot{\hat{W}}_2 = -\eta_2e_3\varphi(X_2) - \sigma_2\hat{W}_2, \quad (32)$$

其中 σ_2 为大于零的常数.

将式(32)代入(31),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -k_1V_1 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 + e_3e_4 - \\ & \sum_{i=1}^2\left(\frac{\sigma_i}{\eta_i}\tilde{W}_i^T\hat{W}_i + e_{i+1}\theta_i\right). \end{aligned} \quad (33)$$

step 4: 定义误差变量 e_4 为

$$e_4 = x_4 - \alpha_3. \quad (34)$$

对 e_4 求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_4 = \dot{x}_4 - \dot{\alpha}_3 = & \frac{1}{J}(\tau + K(x_1 - x_3) - \Delta_2 - d_2 - J\dot{\alpha}_3) = \\ & \frac{1}{J}(\tau + K(x_1 - x_3) - f_2 - d_2), \end{aligned} \quad (35)$$

其中 $f_2 = \Delta_2 + J\dot{\alpha}_3$. 利用神经网络逼近 f_2 , 表示为

$$f_2 = W_3^{*T}\varphi(X_3) + \varepsilon_3^*. \quad (36)$$

其中: W_3^{*T} 为理想权值; ε_3^* 为逼近误差, 满足 $|\varepsilon_3^*| \leq \bar{\varepsilon}_3$, $\bar{\varepsilon}_3$ 为大于零的常数; $X_3 = [x_1, x_2, x_3, x_4, e_2, e_3, \alpha_3]$ 为神经网络输入.

设计控制律 τ , 表达式为

$$\tau = -K(x_1 - x_3) - e_3 + \hat{W}_3^T\varphi(X_3) - k_4e_4. \quad (37)$$

其中: k_4 为大于零的常数, \hat{W}_3^T 为 W_3^{*T} 的估计值.

将式(36)和(37)代入(35),得

$$\dot{e}_4 = \frac{1}{J}(\tilde{W}_3^T\varphi(X_3) - \theta_3 - e_3 - k_4e_4). \quad (38)$$

其中: $\tilde{W}_3^T = \hat{W}_3^T - W_3^{*T}$, $\theta_3 = \varepsilon_3^* + d_2$.

构造李雅普诺夫函数 V_4 为

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2}Je_4^2 + \frac{1}{2\eta_3}\tilde{W}_3^T\tilde{W}_3, \quad (39)$$

其中 η_3 为大于零的常数. 对 V_4 求导,可得

$$\dot{V}_4 = \dot{V}_3 + Je_4\dot{e}_4 + \frac{1}{\eta_3}\tilde{W}_3^T\dot{\tilde{W}}_3. \quad (40)$$

将式(33)和(38)代入(40),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 \leq & -k_1V_1 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 - k_4e_4^2 - \\ & \sum_{i=1}^2\left(\frac{\sigma_i}{\eta_i}\tilde{W}_i^T\hat{W}_i\right) - \sum_{j=1}^3(e_{j+1}\theta_j) + \\ & \tilde{W}_3^T\left(e_4\varphi(X_3) + \frac{1}{\eta_3}\dot{\tilde{W}}_3\right). \end{aligned} \quad (41)$$

设计 \hat{W}_3^T 的自适应律为

$$\dot{\hat{W}}_3 = -\eta_3e_4\varphi(X_3) - \sigma_3\hat{W}_3, \quad (42)$$

其中 σ_3 为大于零的常数.

注3 由式(11)可见, α_1 表达式中 $F_1 > 0$, 且

$$\lim_{e_1 \rightarrow 0} \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi e_1^2}{F_1^2}\right)}{2\pi e_1} \right) = 0.$$

此外, $\dot{\alpha}_1$ 表达式中 $F_1^2 > 0$, 且

$$\lim_{e_1 \rightarrow 0} \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi e_1^2}{F_1^2}\right) \dot{e}_1}{2\pi e_1^2} \right) = \frac{\dot{e}_1}{2F_1^2}.$$

因此, α_1 与 $\dot{\alpha}_1$ 表达式中均不存在奇异值问题.

4 稳定性证明

引理1^[32] 对于初始条件有界的系统, 若存在一个 C^1 连续且正定的 Lyapunov 函数 $V(x)$, 满足 $\|\kappa_1\| \leq V(x) \leq \|\kappa_2\|$, 如 $\dot{V}(x) \leq -\rho V(x) + \gamma$, 其中 $\kappa_1, \kappa_2: R^n \rightarrow R$ 是 K_∞ 类函数且 ρ, γ 为正常数, 则系统的解 $x(t)$ 一致最终有界.

定理1 考虑柔性关节机械臂系统(1), 设计虚拟控制律(11)、(17)、(27), 控制器(37), 自适应律(22)、(32)、(42), 则所有闭环信号能够达到一致最终有界, 且可将跟踪误差约束在边界 $(-F_1, F_1)$ 以内.

证明 选取李雅普诺夫函数为

$$V_s = \frac{F_1^2}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) + \frac{1}{2} I e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \frac{1}{2} J e_4^2 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{2\eta_i} \tilde{W}_i^T \tilde{W}_i \right). \quad (43)$$

对 V_s 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s = & \frac{2F_1 \dot{F}}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) + \sec^2\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) \cdot e_1(e_2 + \\ & \alpha_1 - \dot{y}_d) + e_2(K e_3 + K \alpha_2 - M g L \sin x_1 - \\ & K x_1 - f_1 - d_1) + e_3(e_4 + \alpha_3 - \dot{\alpha}_2) + e_4(\tau + \\ & K(x_1 - x_3) - f_2 - d_2) + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{\eta_i} \tilde{W}_i^T \dot{\tilde{W}}_i \right). \end{aligned} \quad (44)$$

将虚拟控制律(11)、(17)、(27)和控制律(37)代入式(44), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s = & -k_1 V_1 - k_2 e_2 - k_3 e_3 - k_4 e_4 + \\ & \sum_{i=1}^3 \left(\tilde{W}_i^T \left(e_{i+1} \varphi(X_i) + \frac{1}{\eta_i} \dot{\tilde{W}}_i \right) - e_{i+1} \theta_i \right). \end{aligned} \quad (45)$$

将自适应律(22)、(32)和(42)代入式(45), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s \leq & -k_1 V_1 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - k_4 e_4^2 - \\ & \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\sigma_i}{\eta_i} \tilde{W}_i^T \hat{W}_i + e_{i+1} \theta_i \right), \end{aligned} \quad (46)$$

其中 $-\tilde{W}_i^T \dot{\tilde{W}}_i$ 可以改写为

$$\begin{aligned} -\tilde{W}_i^T \dot{\tilde{W}}_i = & -\tilde{W}_i^T (\tilde{W}_i + W_i^*) = \\ & -\tilde{W}_i^T \tilde{W}_i - \tilde{W}_i^T W_i^*. \end{aligned} \quad (47)$$

根据杨氏不等式, 可得

$$-\tilde{W}_i^T W_i^* \leq \frac{1}{2} \tilde{W}_i^T \tilde{W}_i + \frac{1}{2} W_i^{*T} W_i^*. \quad (48)$$

将式(48)代入(47), 可得

$$-\tilde{W}_i^T \dot{\tilde{W}}_i \leq -\frac{1}{2} \tilde{W}_i^T \tilde{W}_i + \frac{1}{2} W_i^{*T} W_i^*. \quad (49)$$

将式(49)代入(46), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s \leq & -k_1 V_1 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - k_4 e_4^2 - \\ & \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\sigma_i}{2\eta_i} \tilde{W}_i^T \tilde{W}_i - \frac{\sigma_i}{2\eta_i} W_i^{*T} W_i^* + e_{i+1} \theta_i \right). \end{aligned} \quad (50)$$

由杨氏不等式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s \leq & -k_1 V_1 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - k_4 e_4^2 - \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\sigma_i}{\eta_i} \tilde{W}_i^T \tilde{W}_i - \frac{\sigma_i}{\eta_i} W_i^{*T} W_i^* - e_{i+1}^2 - \theta_i^2 \right), \end{aligned} \quad (51)$$

其中 \dot{V}_s 可进一步表示为

$$\dot{V}_s \leq -\rho_s V_s + \gamma_s, \quad (52)$$

ρ_s, γ_s 的表达式分别为

$$\begin{aligned} \rho_s = & \min\{k_1, (2k_2 - 1)/I, (2k_3 - 1), \\ & (2k_4 - 1)/J, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}, \\ \gamma_s = & \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\sigma_i}{2\eta_i} W_i^{*T} W_i^* + \frac{1}{2} \theta_i^2 \right). \end{aligned}$$

选取参数 $k_i > 1/2, i = 2, 3, 4$, 则 $\rho_s > 0$. 将式(52)两边同时积分, 可得

$$0 \leq V_s(t) \leq \mu(t), \quad (53)$$

其中

$$\mu(t) = \frac{\gamma_s}{\rho_s} + \left(V_s(0) - \frac{\gamma_s}{\rho_s} \right) e^{-\rho_s t}.$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, V_s 有界, 满足 $0 \leq V_s(t) \leq \gamma_s/\rho_s$. 由 V_s 表达式(43)可知, $e_i (i = 1, 2, 3, 4), \tilde{W}_j (j = 1, 2, 3)$ 能够达到一致最终有界. 因为系统期望轨迹 y_d 与其导数 \dot{y}_d 有界, 由 $e_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 的表达式(8)、(13)、(24)、(34)可知, 系统输出信号 y 以及状态变量 $x_j (j = 2, 3, 4)$ 均有界, 由控制律 τ 表达式(37)可知系统控制器输出也有界, 因此证得系统所有闭环信号均可保证一致最终有界.

由式(43)和(53), 可得

$$\frac{F_1^2}{\pi} \tan\left(\frac{\pi e_1^2}{2F_1^2}\right) \leq \mu(t). \quad (54)$$

解不等式(54), 可得

$$|e_1| \leq \sqrt{2F_1^2 \arctan\left(\frac{\mu(t)\pi}{F_1^2}\right)} / \pi < F_1. \quad (55)$$

由式(55)可知,系统跟踪误差 e_1 约束在边界 $(-F_1, F_1)$ 以内. □.

注4 在本文提出的控制方法中,参数 F_{01} 、 $F_{\infty 1}$ 和 a_1 需要根据约束性能要求设置,且保证 $0 < F_{\infty 1} < F_{01}$, $|e(0)| < F_{01}$. 设置参数 F_{01} 、 $F_{\infty 1}$ 和 a_1 的值越小能够实现的约束效果越好,但可能会增加控制力矩. 同时,较大的控制器增益 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 能够提高收敛速度但也会增加控制力矩. 因此,控制参数 F_{01} 、 $F_{\infty 1}$ 、 a_1 和 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 的选取需要同时考虑约束性能和控制力矩.

5 仿真验证

在本节中,为了更好地体现出本文提出控制方法的有效性和优越性,将以下控制方法进行仿真对比.

M_1 : 本文提出的预设性能自适应控制方法,其中虚拟控制律和控制律表达式为(11)、(17)、(27)、(37),神经网络参数自适应律表达式为(22)、(32)、(42).

M_2 : 文献[25]的状态约束控制方法,其中神经网络及其参数自适应律与 M_1 方法相同,虚拟控制律和控制律分别设计为

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \dot{y}_d - k_1 k_b^2 \sin\left(\frac{\pi e_1^2}{k_b^2}\right) / (2\pi e_1), \\ \alpha_2 &= x_1 + \frac{1}{K} \left(MgL \sin x_1 - \sec^2\left(\frac{\pi e_1^2}{2k_b^2}\right) e_1 + \hat{W}_1^{*T} \varphi(X_1) - k_2 e_2 \right), \\ \alpha_3 &= \hat{W} \varphi(X_2) - K e_2 - k_3 e_3, \\ \tau &= -K(x_1 - x_3) - e_3 + \hat{W}_3^T \varphi(X_3) - k_4 e_4. \end{aligned}$$

M_3 : 文献[33]的反步自适应控制方法,其中神经网络及其参数自适应律与 M_1 方法相同,虚拟控制律和控制律分别设计为

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \dot{y}_d - k_1 e_1, \\ \alpha_2 &= x_1 + \frac{1}{K} (MgL \sin x_1 - e_1 + \hat{W}_1^{*T} \varphi(X_1) - k_2 e_2), \\ \alpha_3 &= \hat{W} \varphi(X_2) - K e_2 - k_3 e_3, \\ \tau &= -K(x_1 - x_3) - e_3 + \hat{W}_3^T \varphi(X_3) - k_4 e_4. \end{aligned}$$

为保证对比的公平性,3种方法的系统参数与控制器参数均保持一致. 参数设置为 $MgL = 5, I = 1, J = 1, K = 40$, 不确定项和干扰设置为

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 0.1I\ddot{q} + 0.1MgL \sin q + 0.1K(q - q_m), \\ \Delta_2 &= 0.1J\ddot{\theta} - 0.1K(q - \theta), \\ d_1 &= 0.1 \sin t, \\ d_2 &= 0.1 \cos t. \end{aligned}$$

神经网络参数设置为 $a = 2, b = 10, c = 1, d =$

$-1, \hat{W}_i = 0, \eta_i = 0.1, \sigma_i = 0.002$, 其中 $i = 1, 2, 3$.

仿真实例1 期望轨迹设置为 $y_d = 0.5(\sin t + \sin 0.5t)$, 系统初始值设置为 $x_1(0) = 0.4, x_j(0) = 0$ ($j = 2, 3, 4$), 控制器增益参数设置为 $k_i = 6$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 受限边界参数设置为 $F_1 = (1 - 0.02)\exp^{-5t} + 0.02, k_b = 0.5$.

仿真效果如图2~图4所示. 图2和图3分别为柔性关节机械臂关节角位置跟踪及跟踪误差效果图. 由图2和图3可见,3种控制方法均可以跟踪上期望轨迹,但相较于其他两种方法,本文所提出的 M_1 方法具有更快的跟踪速度. 需要特别指出的是, M_2 和 M_3 方法的跟踪误差会越过边界 $\pm F_1$, 而本文提出的 M_1 方法则能够保证跟踪误差始终约束在边界 $\pm F_1$ 内, 因此可以提高系统的瞬态性能. 图4为控制器输出效果图.

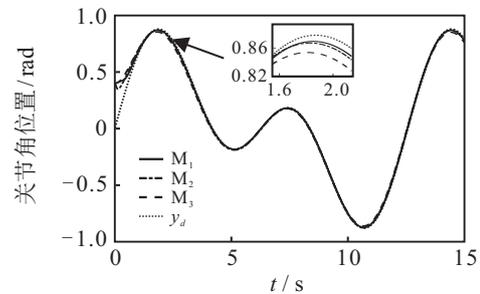


图2 关节角位置跟踪(仿真1)

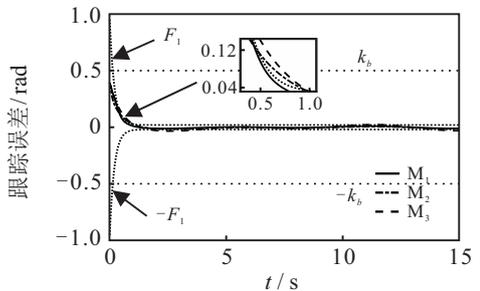


图3 关节角位置跟踪误差(仿真1)

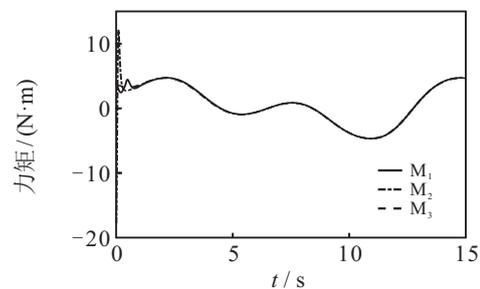


图4 控制器输出(仿真1)

仿真实例2 为了进一步对比3种控制方法的瞬态性能,选择单位阶跃信号作为期望轨迹. 系统初始值设置为 $x_1(0) = 0.6, x_j(0) = 0$ ($j = 2, 3, 4$), 控制器增益参数设置为 $k_i = 5$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 受限边界参数设置为 $F_1 = (1 - 0.02)\exp^{-4t} + 0.02, k_b = 0.5$.

仿真效果如图5~图7所示. 图5为柔性关节机械臂关节角位置跟踪效果图. 由图5可见, 与 M_2 和 M_3 方法相比, 本文提出的 M_1 方法能够保证较好的瞬态性能, 即较小的超调量和较快的跟踪速度. 图6为关节角位置跟踪误差效果图. 由图6可见, M_2 和 M_3 方法的跟踪误差会越过边界 $\pm F_1$, 而 M_1 方法的跟踪误差始终约束在边界 $\pm F_1$ 内, 可以通过预先设定 F_1 的函数参数值保证柔性关节机械臂良好的瞬态和稳态跟踪性能. 图7为控制器输出效果图.

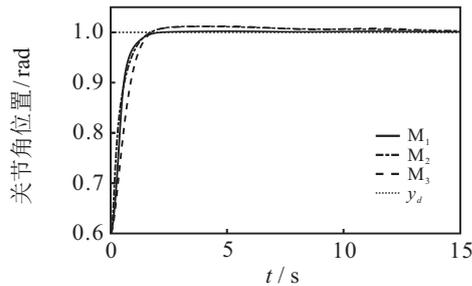


图5 关节角位置跟踪(仿真2)

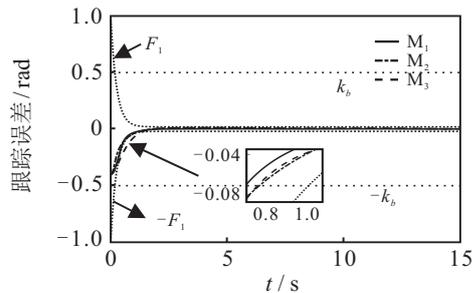


图6 关节角位置跟踪误差(仿真2)

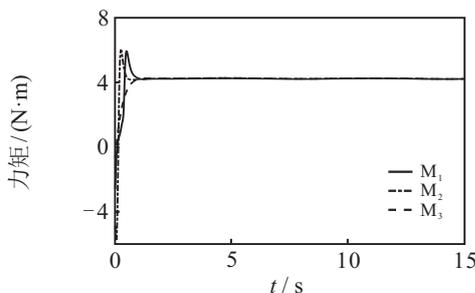


图7 控制器输出(仿真2)

综上, 由两组实例仿真结果可以看出, 相较于 M_2 、 M_3 方法, 本文提出的 M_1 方法有较小的超调量和较快的跟踪速度, 能够同时保证良好的系统稳态和瞬态性能, 实现柔性关节机械臂系统输出对期望轨迹的快速准确跟踪.

6 结论

本文针对带有输出约束和模型不确定的柔性关节机械臂, 提出一种能够同时适用于约束与非约束情况的时变正切型障碍李雅普诺夫函数, 拓宽了传统对数型障碍李雅普诺夫函数的适用范围. 提出的障碍李雅普诺夫函数可以通过预先设置指数衰减的时

变边界参数, 保证系统输出的瞬态性能和稳态性能要求. 在此基础上, 结合反演法设计预设性能自适应控制器, 实现了柔性关节机械臂系统输出对期望轨迹的快速准确跟踪控制, 同时保证系统的输出约束性能. 最后, 基于李雅普诺夫稳定性定理证明了闭环系统所有信号的一致最终有界性, 并通过对比仿真结果验证了所提出方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Yang C G, Jiang Y M, He W, et al. Adaptive parameter estimation and control design for robot manipulators with finite-time convergence[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8112-8123.
- [2] 刘建昌, 苗宇. 基于神经网络补偿的机械臂轨迹控制策略的研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 732-736. (Liu J C, Miao Y. Research on trajectory control strategy of manipulator based on neural network compensation[J]. Control and Decision, 2005, 20(7): 732-736.)
- [3] 徐辉. 柔性关节机器人系统设计[D]. 南京: 东南大学机械工程学院, 2017. (Xu H. Design of flexible joint robot system[D]. Nanjing: College of Mechanical Engineering, Southeast University, 2017.)
- [4] Yoo S J, Park J B, Choi Y H. Adaptive output feedback control of flexible-joint robots using neural networks: dynamic surface design approach[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(10): 1712-1726.
- [5] Ling S, Wang H Q, Liu P X. Adaptive fuzzy dynamic surface control of flexible-joint robot systems with input saturation[J]. CAA Journal of Automatica Sinica, 2019, 6(1): 97-107.
- [6] Liu X, Zhao F, Ge S S, et al. End-effector force estimation for flexible-joint robots with global friction approximation using neural networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1730-1741.
- [7] Abdollahi F, Talebi H A, Patel R V. A stable neural network-based observer with application to flexible-joint manipulators[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2006, 17(1): 118-129.
- [8] Lozano R, Brogliato B. Adaptive control of robot manipulators with flexible joints[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(2): 174-181.
- [9] Ge S S. Adaptive controller design for flexible joint manipulators[J]. Automatic, 1996, 32(2): 273-278.
- [10] Park C W, Cho Y W. Adaptive tracking control of flexible joint manipulator based on fuzzy model reference approach[J]. IEE Proceedings—Control Theory and Applications, 2003, 150(2): 198-204.
- [11] 顾义坤, 倪风雷, 刘宏. 基于RENN的柔性关节机械臂自适应动态面控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(12): 1783-1790. (Gu Y K, Ni F L, Liu H. Adaptive dynamic surface control of flexible joint manipulator based on RENN[J]. Control of flexible joint manipulator based on RENN[J]. Control

- and Decision, 2011, 26(12): 1783-1790.)
- [12] Yun J N, Su J B. Design of a disturbance observer for a two-link manipulator with flexible joints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2): 809-815.
- [13] Dong F F, Zhao X M, Han J, et al. Optimal fuzzy adaptive control for uncertain flexible joint manipulator based on D-operation[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(9): 1286-1298.
- [14] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2090-2099.
- [15] Na J, Chen Q, Ren X M, et al. Adaptive prescribed performance motion control of servo mechanisms with friction compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 486-494.
- [16] Wang S B, Na J, Ren X M. Rise-based asymptotic prescribed performance tracking control of nonlinear servo mechanisms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 48(12): 2359-2370.
- [17] Na J, Huang Y B, Wu X, et al. Active adaptive estimation and control for vehicle suspensions with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(6): 2063-2077.
- [18] Ilchmann A, Ryan E P, Trenn S. Tracking control: Performance funnels and prescribed transient behaviour[J]. Systems & Control Letters, 2005, 54(7): 655-670.
- [19] 陈强, 汤筱晴. 带有饱和的电机伺服系统非奇异终端滑模funnel控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1064-1071.
(Chen Q, Tang X Q. Nonsingular terminal sliding mode funnel control for motor servo system with saturation[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(8): 1064-1071.)
- [20] Wang S B, Ren X M, Na J, et al. Extended-state-observer-based funnel control for nonlinear servomechanisms with prescribed tracking performance[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1): 98-108.
- [21] Ngo K B, Mahony R, Jiang Z P. Integrator backstepping using barrier functions for systems with multiple state constraints[C]. Proceedings of the 4th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE, 2005: 8306-8312.
- [22] 张天平, 王宁宁, 夏梅珍. 具有未建模动态和输出约束系统的自适应输出反馈控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(1): 55-62.
(Zhang T P, Wang N N, Xia M Z. Adaptive output feedback control for systems with unmodeled dynamics and output constraint[J]. Control and Decision, 2017, 32(1): 55-62.)
- [23] He W, Yan Z C, Sun Y K, et al. Neural-learning-based control for a constrained robotic manipulator with flexible joints[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(12): 5993-6003.
- [24] He W, Huang H F, Ge S S. Adaptive neural network control of a robotic manipulator with time-varying output constraints[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(10): 3136-3147.
- [25] Xu J X, Jin X. State-constrained iterative learning control for a class of MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(5): 1322-1327.
- [26] Liu X, Yang C G, Chen Z G, et al. Neuro-adaptive observer based control of flexible joint robot[J]. Neurocomputing, 2018, 275: 73-82.
- [27] Wang M, Yang A L. Dynamic learning from adaptive neural control of robot manipulators with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(8): 2244-2255.
- [28] 王红旗, 王庆林. 移动机械手鲁棒自适应模糊控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 461-465.
(Wang H Q, Wang Q L. Robust and adaptive fuzzy control for mobile manipulator[J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 461-465.)
- [29] Li M M, Li Y N, Ge S S, et al. Adaptive control of robotic manipulators with unified motion constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(1): 184-194.
- [30] He W, David A O, Yin Z, et al. Neural network control of a robotic manipulator with input deadzone and output constraint[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(6): 759-770.
- [31] Chen Q, Ren X M, Na J, et al. Adaptive robust finite-time neural control of uncertain PMSM servo system with nonlinear dead zone[J]. Neural Computing and Applications, 2017, 28(12): 3725-3736.
- [32] Zhang T, Ge S S, Hang C C. Adaptive neural network control for strict-feedback nonlinear systems using backstepping design[J]. Automatica, 2000, 36(12): 1835-1846.
- [33] Ge S S, Wang C. Adaptive neural control of uncertain MIMO nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2004, 15(3): 674-692.

作者简介

陈强(1984—), 男, 副教授, 从事非线性伺服系统建模与控制等研究, E-mail: sdnjchq@zjut.edu.cn;

丁科新(1994—), 男, 硕士生, 从事非线性伺服系统建模与控制的研究, E-mail: dkx17326028828@163.com;

南余荣(1966—), 男, 教授, 从事电机控制、电力电子及其应用等研究, E-mail: nyr@zjut.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)