

控制与决策

Control and Decision

基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制

李德昀, 徐德刚, 桂卫华

引用本文:

李德昀, 徐德刚, 桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1311–1323.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

线控转向系统的自适应高阶滑模控制

Adaptive higher-order sliding mode control for SbW system

控制与决策. 2021, 36(6): 1529–1536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1526>

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft

控制与决策. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor

控制与决策. 2021, 36(3): 693–698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的 双机械臂协同阻抗控制

李德昀, 徐德刚[†], 桂卫华

(中南大学 自动化学院, 长沙 410083)

摘要: 多机械臂的精准协同控制已成为当前机器人领域的研究难点, 为实现双机械臂精准控制, 通过建立双机械臂动力学模型, 采用时间延时估计简化机械臂动力学模型, 在保证控制系统稳定性的前提下, 引入自适应模糊滑模控制器实现对估计误差的修正和补偿, 设计基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制的双机械臂协同阻抗控制器, 实现双机械臂协同操作的末端轨迹控制以及接触力精准控制. 最后, 将该控制器应用于两台六自由度机械臂仿真平台, 实现双臂夹取和搬运同一目标物体的操作, 通过与其他控制器进行对比实验, 表明所设计的控制器具有响应快、无抖震、精度高的特点.

关键词: 双机械臂协同操作; 阻抗控制; 时间延时估计; 滑模控制; 模糊控制; 自适应控制

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1701

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 李德昀, 徐德刚, 桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1311-1323.

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller

LI De-yun, XU De-gang[†], GUI Wei-hua

(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Precise collaborative control of multi-manipulators has become a research difficulty in the current field of robotics. In order to achieve precise control of dual-arm, this paper establishes a dynamic model of dual-arm and uses time delay estimation to simplify it. Under the premise of ensuring the stability of the control system, an adaptive fuzzy sliding mode controller is introduced, which realizes the correction and compensation of the estimation error. Then, a coordinated impedance controller for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode control is designed to realize the trajectory tracking of the end-effector and contact force control of dual manipulators. Finally, this control system is simulated and applied to two 6-DOF manipulators to pick up and carry the same target object. The comparison experiment in comparison with other controllers verifies that this controller has faster response speed and higher control accuracy with less jitter.

Keywords: dual-arm cooperation; impedance control; time delay estimation; sliding mode control; fuzzy control; adaptive control

0 引言

机械臂能够代替人类进行复杂的重复劳动, 在工业过程、医疗服务、航空航天等领域使用机械臂可以有效地降低劳动成本, 提高生产效率, 将人们从危险的工作环境中解放出来^[1-4]. 近年来, 由于生产任务变得更为复杂, 传统的机器人已经难以满足生产要

求. 由两台机械臂组成的双臂系统具有更高的灵活性和更大的额定负载, 可以完成更为复杂的协作任务. 因此, 双臂协调控制策略在国内外得到了广泛研究^[5]. 然而, 双臂协作任务对机械臂末端控制精度提出了更高的要求^[6]. 目前, 实现机械臂精准控制的主要难点是机械臂的动力学模型难以精确、快速地建

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61973320); 国家重点研发计划项目(2018YFB1309002); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(61621062).

责任编辑: 方勇纯.

[†]通讯作者. E-mail: dgxu@csu.edu.cn.

模和求解,机械臂关节个数的增加将导致传统的拉格朗日动力学计算方法的计算量逐渐变大.另外,机械臂动力学模型存在各种不确定扰动因素,使得机械臂动力学建模和末端轨迹控制变得更加困难,这些因素限制了双机械臂协作系统的控制精度及实时性.

为了在多机械臂协作系统中实现精确的末端轨迹控制,以阻抗控制器^[7]为外环、基于动力学模型的力矩控制器为内环的控制策略成为国内外研究热点.文献[8]在考虑摩擦力的情况下对二自由度机械臂进行动力学模型建模,实现了机械臂的阻抗控制;文献[9]设计了基于动力学模型的滑模控制器,并将其应用在七自由度双机械臂系统中,但是该控制器的参数较多,系统的辨识、建模和整定将变得十分复杂;为此,文献[10]提出了时间延时估计估算机械臂动力学模型的方法,借助上一时刻机械臂动力学参数估算当前时刻的动力学状态,简化了动力学模型,降低了计算量,但这种方法的控制精度与系统采样频率有关,且始终存在估计偏差;文献[11-12]将时间延时估计与期望速度反馈补偿相结合,实现了对两台六自由度机械臂的阻抗控制,然而,速度反馈难以修正由各种不确定扰动因素造成的估计误差,使得这种控制系统的鲁棒性较差;为此,文献[13-14]分别将终端滑模控制和自适应积分滑模控制应用于时间延时估计中来补偿估计误差,提升了系统的鲁棒性,但是普通的滑模控制器均存在一定的抖震现象,使得双臂协作任务难以顺利完成.近年来,借助万能逼近定理实现对机械臂动力学模型中不确定扰动进行补偿的自适应模糊滑模控制器的研究取得了一定进展,文献[15]将自适应模糊滑模控制器与传统的拉格朗日动力学模型相结合,将其应用在水下的三自由度机械臂中,经仿真实验验证,该控制器抖震小,能够有效抵消水下环境对机械臂的不确定扰动因素,具有更强的鲁棒性.

本文针对机械臂动力学模型非线性、强耦合、多变量特点,采用时间延时估计TDE(time delay estimation)简化机械臂的动力学计算过程,在TDE模型的基础上,为了提高控制精度,减小位置跟踪的稳态误差,引入自适应模糊滑模控制器AFSMC(adaptive fuzzy sliding mode controller)补偿时间延时估计产生的估计误差,借助万能逼近定理抵消机械臂动力学模型中的非线性因子和不确定因素对系统造成的干扰,组成基于TDE+AFSMC的控制策略来生成机械臂控制力矩,并将其应用于双臂协同阻抗控制器中,以实现两台六自由度机械臂协作搬运目标物

的操作.

1 双臂协作任务的运动学建模

双机械臂搬运目标物体的任务由于存在更加严格的运动学约束和动力学约束,属于紧协调操作任务^[16].设双臂进行夹取和搬运目标物体的任务时,机械臂末端始终与目标物体接触且没有相对位移,接触方向始终和目标物体表面垂直,且双臂末端的空间位置始终在同一水平轴线上,如图1所示^[17].本文用齐次位姿矩阵 $T \in R^{4 \times 4}$ 表示物体的位姿,用左下标表示当前描述的坐标系,左上标表示参考坐标系,设世界坐标系为 $\{O\}$,在空间中有两台机械臂分别为臂A和臂B,它们的末端位姿坐标系设为 $\{O_A\}$ 和 $\{O_B\}$,基坐标系设为 $\{O_1\}$ 和 $\{O_2\}$.

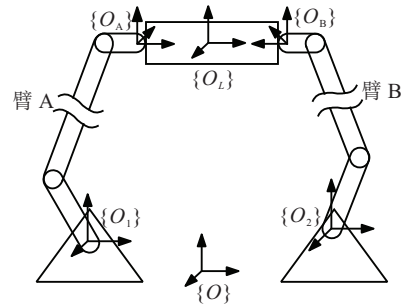


图1 双机械臂空间结构和坐标系

设 ${}^O_A T$ 和 ${}^O_B T$ 分别为机械臂A和机械臂B的末端相对于世界坐标系 $\{O\}$ 的位姿描述.设空间中某目标物体,取其几何中点为原点建立坐标系 $\{O_L\}$,设 ${}^O_L T$ 为目标物体在 $\{O\}$ 中的位姿描述.目标物体相对于臂A和臂B末端的位姿可以表示为 ${}^A_L T$ 和 ${}^B_L T$.由此,搬运该物体时双臂之间位姿约束关系可表示为

$${}^O_L T = {}^O_A T {}^A_L T = {}^O_B T {}^B_L T, \quad (1)$$

即

$${}^O_A T = {}^O_L T {}^A_L T = {}^O_L T {}^A_L T^{-1}, \quad (2)$$

$${}^O_B T = {}^O_L T {}^B_L T = {}^O_L T {}^B_L T^{-1}. \quad (3)$$

对于双臂协作搬运目标物体的任务,可设双臂末端相对位姿不变,相对距离和目标物体的尺寸相等,即 ${}^A_L T$ 和 ${}^B_L T$ 保持不变^[18].已知某期望轨迹上每一点的目标物体空间位姿为 ${}^O_L T$,利用式(2)和(3)可计算出符合位姿约束条件的双臂末端的齐次位姿矩阵 ${}^O_A T$ 和 ${}^O_B T$.

对于 ${}^O_A T$,有

$${}^O_A T = \begin{bmatrix} \text{Rot}^A & P^A \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中: $\text{Rot}^A \in R^{3 \times 3}$ 为旋转矩阵, $P^A \in R^3$ 为位置矢

量. 利用 Rodrigues 公式可将旋转矩阵 Rot^A 转换为旋转矢量 $r^A \in R^3$. Rodrigues 公式的一般表示形式为

$$\begin{bmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} = \frac{\text{Rot} - \text{Rot}^T}{2}. \quad (5)$$

$$r = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T. \quad (6)$$

由此可得机械臂 A 的末端期望位姿矢量 $X_d^A \in R^6$, 即

$$X_d^A = [P^A \ r^A]^T. \quad (7)$$

同理可得

$$X_d^B = [P^B \ r^B]^T. \quad (8)$$

为了将笛卡尔空间的控制量转化为关节空间的控制量, 需要对机械臂进行逆运动学计算. 雅可比矩阵法是进行机械臂运动学计算的一种通用方法.

设 X^A 、 X^B 分别为臂 A 和臂 B 的末端位姿矢量, J^A 、 J^B 分别为臂 A 与臂 B 的雅可比矩阵, q^A 、 q^B 分别为臂 A 和臂 B 的各关节角度值. 对于由两台自由度均为 n 的机械臂组成的双机械臂系统, 设 $X = [X^A \ X^B]^T \in R^{2n}$ 为双臂末端位姿矢量, $J = \text{diag}(J^A, J^B) \in R^{2n \times 2n}$ 为双臂雅可比矩阵, $q = [q^A \ q^B]^T \in R^{2n}$ 为双臂关节角度值. 由此可得双臂系统的雅可比运动学计算公式为

$$\dot{X} = J\dot{q}. \quad (9)$$

为了得到角加速度与笛卡尔轨迹加速度之间的关系, 将等号两边同时对时间 t 求导, 可得

$$\ddot{X} = J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q}, \quad (10)$$

即

$$\ddot{q} = J^{-1}(\ddot{X} - \dot{J}\dot{q}). \quad (11)$$

2 双臂协同阻抗控制器设计

双臂末端夹持和搬运目标物体过程的力学模型可以由图2表示^[19].

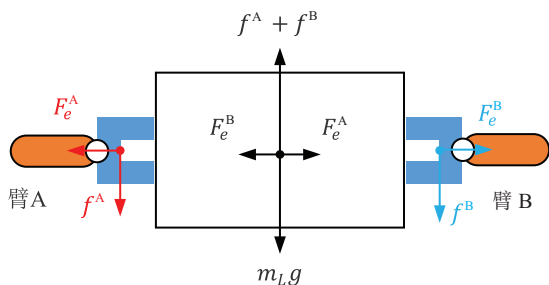


图2 双臂末端夹目标物体的牛顿受力分析

在双臂搬运目标物体处于静止或匀速运动状态时, 目标物体处于受力平衡状态, 则有如下公式:

$$\begin{cases} F_e^A = F_e^B, \\ f^A = f^B = \frac{1}{2}m_L g, \\ f^A \leq \mu F_e^A, \\ f^B \leq \mu F_e^B. \end{cases} \quad (12)$$

其中: f^A 和 f^B 是双臂末端对目标物体的静摩擦力; F_e^A 和 F_e^B 是双臂各自对目标物体的表面压力, 同时也是目标物体对机械臂末端的表面接触力, 二者大小相等, 方向相反. 在目标物体静止或匀速直线运动时, 两个臂各自对目标物体的表面压力是相等的, 对目标物体的摩擦力也是相等的. μ 是目标物体和双臂末端表面的摩擦系数, m_L 是目标物体的质量, g 是重力加速度. 因此, 为了完成双臂夹取和搬运目标物体的任务, 应满足

$$F_e^A = F_e^B \geq \frac{m_L g}{2\mu}. \quad (13)$$

同时, 由于牛顿第三定律, 双臂在夹紧和搬运目标物体时也会受到目标物体接触力的反作用力以及摩擦力的反作用力, 如图2所示.

设机械臂末端与该物体的接触满足胡克模型, 双臂系统两个末端各自所受接触力的大小与双臂挤压该物体时产生的微小形变有关^[20], 即

$$|F_e^A| = |F_e^B| = \frac{1}{2}K_e \Delta X_e. \quad (14)$$

其中: K_e 是双臂末端的刚度系数; ΔX_e 是双臂挤压物体时产生的总形变值, 可以通过下式求得:

$$\Delta X_e = \begin{cases} l - |P^A - P^B|, & l > |P^A - P^B|; \\ 0, & l \leq |P^A - P^B|. \end{cases} \quad (15)$$

这里 l 是目标物体的长度.

阻抗控制算法可以由力传感器反馈的实际接触力与期望接触力的误差, 对机械臂运动学计算得到的期望轨迹进行修正, 以满足机械臂末端的接触力要求. 为实现双臂系统对机械臂末端接触力的协同阻抗控制, 可将单臂阻抗控制算法^[21]推广到双臂系统

$$M_d(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d) = F_e - F_d. \quad (16)$$

其中: $M_d \in R^{12 \times 12}$ 为惯性矩阵, $B_d \in R^{12 \times 12}$ 为阻尼矩阵, $K_d \in R^{12 \times 12}$ 为刚度矩阵; X_d 、 \dot{X}_d 、 $\ddot{X}_d \in R^{12 \times 12}$ 分别为双臂末端执行器的期望轨迹的位移、速度以及加速度矢量; X 、 \dot{X} 、 $\ddot{X} \in R^{12 \times 12}$ 分别为双臂末端实际的位移、速度和加速度矢量; $F_d = [F_d^A \ F_d^B]^T \in R^{12}$ 为双臂末端期望接触力, $F_e = [F_e^A \ F_e^B]^T \in R^{12}$ 为双臂末端实际接触力.

由于机械臂运动时的力/力矩与笛卡尔轨迹的加速度有关,对式(16)变形,将 $X_d = [X_d^A \ X_d^B]^T$ 代入,可得

$$\ddot{X} = \ddot{X}_d + M_d^{-1}[F_d - F_e + B_d(\dot{X}_d - \dot{X}) + K_d(X_d - X)]. \quad (17)$$

为实现双臂的各关节力矩控制,以 \ddot{X} 作为控制量 \ddot{X}_u ,将 \ddot{X}_u 代入式(11),即可得到双臂角加速度控制量,即动力学控制内环的期望值 \ddot{q}_d .

3 基于时间延时估计的双机械臂自适应模糊滑模力控制

机械臂模型是一个高度动态、耦合和带有不确定性的非线性系统^[22],在由两台机械臂组成的双机械臂系统中进行精确的动力学计算,显然会耗费大量的资源,且难以保证双臂阻抗控制的实时性.因此,本节通过对机械臂动力学模型的分析,采用一种较精确且快速的机械臂动力学估计算法,实现基于机械臂动力学模型的双臂协同阻抗控制.

由两台自由度均为 n 的机械臂组成的双臂协作系统,其双机械臂关节空间的动力学模型方程一般可描述为

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + F_c(\dot{q}) + F_{st}(q, \dot{q}) + F_v(\dot{q}) + \tau_d + \tau_e. \quad (18)$$

其中: $\tau \in R^{2n}$ 为机械臂各个关节的驱动力矩, $M(q) = \text{diag}(M_A(q), M_B(q)) \in R^{2n \times 2n}$ 为双臂组合惯性矩阵, $C(q, \dot{q}) = [C_A(q, \dot{q}) \ C_B(q, \dot{q})]^T \in R^{2n}$ 为双臂科氏力与离心力矩阵, $G(q) = [G_A(q) \ G_B(q)]^T \in R^{2n}$ 为双臂重力矩阵, $F_c(\dot{q}) = [F_{cA}(\dot{q}) \ F_{cB}(\dot{q})]^T \in R^{2n}$ 为库伦摩擦力, $F_{st}(q, \dot{q}) = [F_{stA}(q, \dot{q}) \ F_{stB}(q, \dot{q})]^T \in R^{2n}$ 为粘性摩擦力, $F_v(\dot{q}) = [F_{vA}(\dot{q}) \ F_{vB}(\dot{q})]^T \in R^{2n}$ 为粘滞力, $\tau_d \in R^{2n}$ 为扰动力矩, $\tau_e \in R^{2n}$ 为双臂与外界环境接触时所受力矩.

3.1 基于时间延时估计TDE的机械臂动力学模型

为了得到控制力矩 τ 与关节角加速度之间的关系,引入一个惯性矩阵的估计值 \bar{M} ,代入式(18)并进行变形,可得

$$\tau = \bar{M}\ddot{q} + N(q, \dot{q}, \ddot{q}). \quad (19)$$

其中: $\bar{M} \in R^{2n \times 2n}$ 为一个正定常对角矩阵,在实际应用中可由用户整定得到; $N(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R^{2n}$ 包含了惯性矩阵估计值与实际值的偏差、动力学模型中与 \ddot{q} 非线性关系的其他部分,以及不确定扰动项 τ_d ,即

$$N(q, \dot{q}, \ddot{q}) = [M(q) - \bar{M}]\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + F_c(\dot{q}) + F_{st}(q, \dot{q}) + F_v(\dot{q}) + \tau_d + \tau_e. \quad (20)$$

针对动力学模型中的非线性部分 $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$,可利用它的部分线性特征,采用时间延时估计TDE对该部分进行较精确的估算.本文用 \hat{N} 表示 $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 的估计值.

设采样时间间隔 L 足够小,则可以将某个时刻 t 时的机械臂动力学模型的非线性部分 $N(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 近似地看作

$$N(q, \dot{q}, \ddot{q})_{(t)} \approx N(q, \dot{q}, \ddot{q})_{(t-L)} \triangleq \hat{N}. \quad (21)$$

再由式(19)可得

$$N(q, \dot{q}, \ddot{q})_{(t-L)} = \tau_{(t-L)} - \bar{M}\ddot{q}_{(t-L)}. \quad (22)$$

式(22)描述了时间延时估计的基本原理,即在采样时间间隔 L 足够小的前提下,利用上一时刻的控制力矩 $\tau_{(t-L)}$ 作用下的机械臂各关节实际角加速度 $\ddot{q}_{(t-L)}$ 估算系统此刻的状态.因此可得基于时间延时估计TDE的机械臂动力学方程

$$\tau = \bar{M}\ddot{q} + \hat{N} + \Delta N = \bar{M}\ddot{q} + \tau_{(t-L)} - \bar{M}\ddot{q}_{(t-L)} + \Delta N, \quad (23)$$

其中 $\Delta N = N(q, \dot{q}, \ddot{q})_{(t)} - N(q, \dot{q}, \ddot{q})_{(t-L)}$ 被定义为时间延时估计误差.

3.2 基于估计动力学模型的滑模控制

时间延时估计只能对机械臂原动力学模型中具有线性特征的因子进行估算,将强非线性部分以及外界扰动等不确定因素全部划归到 ΔN 中,另外,机械臂负载变化也会导致机器人动力学模型参数变化, ΔN 也会随之改变.因此,为提升控制系统的鲁棒性和自适应能力,在得到了基于时间延时估计简化后的动力学模型之后,采用滑模控制策略结合自适应模糊系统,消除滑模控制中的抖震,实现滑模控制中切换增益对时间延时估计误差 ΔN 的自适应逼近^[23].在此之前首先分析时间延时估计的机械臂动力学模型,为其设计滑模控制器.

首先,定义关节角度的跟踪误差为

$$e = q_d - q. \quad (24)$$

由滑模控制原理定义误差函数,即滑模面为

$$s = \dot{e} + \lambda e, \quad (25)$$

其中 $\lambda \in R^{2n \times 2n}$ 是一个常对角矩阵.

设计基于期望速度反馈的时间延时估计误差补

偿控制器TDE+IVF^[12]为

$$\begin{cases} \tau = \bar{M}v + \hat{N}, \\ v = \ddot{q}_d + \lambda\dot{e}. \end{cases} \quad (26)$$

结合上式,针对式(23)可设计出基于符号函数的传统滑模控制器TDE+SMC(sgn)如下:

$$\begin{cases} \tau = \bar{M}v + \hat{N}, \\ v = \ddot{q}_d + \lambda\dot{e} + \bar{M}^{-1}K\text{sgn}(s). \end{cases} \quad (27)$$

其中: $K \in R^{2n \times 2n}$ 为滑模控制器的切换增益矩阵,由用户整定^[24-25].

将该式与式(23)联立,可得

$$\ddot{q} = v - \bar{M}^{-1}\Delta N, \quad (28)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \lambda\dot{e} + \ddot{e} = \lambda\dot{e} + \ddot{q}_d - \ddot{q} = \\ &\lambda\dot{e} + \ddot{q}_d - \ddot{q}_d - \lambda\dot{e} - \bar{M}^{-1}K\text{sgn}(s) + \bar{M}^{-1}\Delta N = \\ &\bar{M}^{-1}[\Delta N - K\text{sgn}(s)]. \end{aligned} \quad (29)$$

取Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2}s^T s, \quad (30)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2}s^T \dot{s} + \frac{1}{2}\dot{s}^T s = s^T \dot{s} = \\ &s^T \bar{M}^{-1}[\Delta N - K\text{sgn}(s)]. \end{aligned} \quad (31)$$

令 K 的每个元素均大于 ΔN , 即取 $k_i > \Delta n_i$, 则 $\dot{V} \leq 0$. 由于 V 是正定、正则的, 而 \dot{V} 是负定的, 由李雅普诺夫全局稳定性定理可知, 系统在平衡点是全局渐近稳定的.

由于传统的滑模控制器抖震较大, 采用饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 替代符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$, 对传统滑模控制器进行优化, 可得基于饱和函数的滑模控制器TDE+SMC(sat)为

$$\begin{cases} \tau = \bar{M}v + \hat{N}, \\ v = \ddot{q}_d + \lambda\dot{e} + \bar{M}^{-1}K\text{sat}\left(\frac{s}{\delta}\right). \end{cases} \quad (32)$$

其中: δ 是符号为正的常数, 取饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 为

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s, & |s| \leq 1; \\ \text{sgn}(s), & |s| > 1. \end{cases} \quad (33)$$

则有

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\delta}\right) = \left[\text{sat}\left(\frac{s_1}{\delta}\right) \text{sat}\left(\frac{s_2}{\delta}\right) \dots \text{sat}\left(\frac{s_{2n}}{\delta}\right) \right]^T. \quad (34)$$

同理, 选取Lyapunov函数为 $V = \frac{1}{2}s^T s$, 则 $\dot{V} = s^T \bar{M}^{-1}[\Delta N - K\text{sat}\left(\frac{s}{\delta}\right)]$, 亦可证得, 当取 $k_i > \Delta n_i$

时, $\dot{V} \leq 0$, 该系统同样可以全局渐近稳定. 式(26)、(27)、(32)所示的实际控制器的实际控制效果将在下文仿真实验中进行展示和对比.

3.3 自适应模糊滑模控制

为了进一步减小抖震, 提高响应速度和系统的自适应能力, 抵消由TDE估计误差和不确定扰动因素对系统的影响, 选用自适应模糊增益调整的机械臂滑模控制策略. 目前已经证明, 采用模糊系统可以实现对任意连续函数的精确逼近, 因此可以采用模糊系统并结合自适应策略输出合适的滑模增益 K 来逼近 ΔN , 实现对 ΔN 的补偿^[26].

首先设计模糊滑模增益滑模控制器. 采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器设计模糊系统, 则系统的输出为

$$y = \frac{\sum_{m=1}^M \theta^m \prod_{i=1}^{2n} \mu_{A_i^m}(x_i^*)}{\sum_{m=1}^M \prod_{i=1}^{2n} \mu_{A_i^m}(x_i^*)} = \theta^T \Psi(x). \quad (35)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta &= [\theta^1 \dots \theta^m \dots \theta^M]^T; \\ \Psi(x) &= [\psi^1(x) \dots \psi^m(x) \dots \psi^M(x)]^T, \\ \psi^m(x) &= \prod_{i=1}^{2n} \mu_{A_i^m}(x_i^*) / \sum_{m=1}^M \prod_{i=1}^{2n} \mu_{A_i^m}(x_i^*); \end{aligned}$$

M 为模糊规则的个数; $2n$ 为双机械臂系统关节总个数, 也是模糊控制器输入量的个数.

由此, 基于模糊增益的滑模控制器(FSMC)可设计为

$$\begin{cases} \tau = \bar{M}v + \hat{N}, \\ v = \ddot{q}_d + \lambda\dot{e} + As + \bar{M}^{-1}K. \end{cases} \quad (36)$$

其中: $K = [k_1 \dots k_i \dots k_{2n}]^T$; k_i 为第 i 个模糊系统的输出; $A = \text{diag}(a_1, \dots, a_i, \dots, a_{2n})$ 为正定矩阵; As 项为滑模控制器的等效滑模控制部分, 用于对角位置偏差和角速度偏差进行滑模控制; 而自适应模糊滑模 $\bar{M}^{-1}K$ 为滑模控制器的切换控制部分, 用于补偿TDE估计误差和外界干扰等不确定扰动因素^[26].

对该控制器进行Lyapunov分析, 取Lyapunov函数为 $V = \frac{1}{2}s^T s$, 将模糊增益滑模控制器与式(23)联立可得 $\ddot{q} = v - \bar{M}^{-1}\Delta N$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \lambda\dot{e} + \ddot{e} = \lambda\dot{e} + \ddot{q}_d - \ddot{q} = \\ &\lambda\dot{e} + \ddot{q}_d - \ddot{q}_d - \lambda\dot{e} - As - \bar{M}^{-1}K + \bar{M}^{-1}\Delta N = \end{aligned}$$

$$\bar{M}^{-1}(\Delta N - K) - As, \quad (37)$$

从而

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} = \\ s^T \bar{M}^{-1}(\Delta N - K) - s^T As &= \\ \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - k_i) \right] - s^T As. \end{aligned} \quad (38)$$

其中 m_i 是正对角矩阵 \bar{M} 的第 i 行 i 列对角线上的元素. 由上式可知, 为了保证 $\dot{V} \leq 0$, 首先应使 s_i 与 k_i 的符号相同, 这也是滑模控制的基本要求. 与 sat 滑模一样, 当误差值 $|s_i|$ 较大时, 为了保证 \dot{V} 是较大的负数, 应使 $|k_i|$ 也增大; 当误差值 $|s_i|$ 较小时, 应使 $|k_i|$ 也减小, 这样就可以保证系统是李雅普诺夫稳定的. 由此, 以误差函数值 s_i 作为输入, 以滑模切换增益 k_i 作为输出, 则模糊规则采用如下形式:

$$\text{if } s_i \text{ is } A_i^m \text{ then } k_i \text{ is } B_i^m,$$

其中 A_i^m 和 B_i^m 分别为输入的模糊集和输出的模糊集. 由于模糊控制本身实时性较差, 而双机械臂动力学模型是充满时变和不确定因素的复杂系统, 为了减小系统计算量, 提升响应速度, 设模糊控制器共包含 5 个模糊集, 将模糊规则设计为

- if s_i is NB then k_i is NB,
- if s_i is NS THEN k_i is NS,
- if s_i is ZE THEN k_i is ZE,
- if s_i is PS THEN k_i is PS,
- if s_i is PB THEN k_i is PB.

设计表示模糊集的隶属度函数为高斯函数, 如图3所示, 即

$$\mu_A(x_i) = \exp \left[- \left(\frac{x_i - \alpha}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (39)$$

则模糊系统的输入输出关系式为

$$k_i = \frac{\sum_{m=1}^M \theta_{k_i}^m \mu_{A^m}(s_i)}{\sum_{m=1}^M \mu_{A^m}(s_i)} = \theta_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i). \quad (40)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta_{k_i} &= [\theta_{k_i}^1, \dots, \theta_{k_i}^m \dots \theta_{k_i}^M]^T; \\ \Psi_{k_i}(s_i) &= [\psi_{k_i}^1(s_i) \dots \psi_{k_i}^m(s_i) \dots \psi_{k_i}^M(s_i)]^T, \\ \psi^m(x) &= \prod_{i=1}^{2n} \mu_{A_i^m}(x_i^*) / \sum_{m=1}^M \prod_{i=1}^{2n} \mu_{A_i^m}(x_i^*); \end{aligned}$$

M 为模糊集的个数.

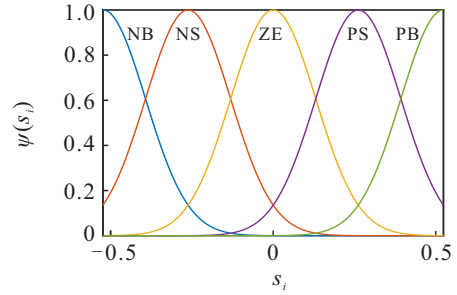


图3 高斯模糊函数

针对模糊增益滑模控制器(FSMC), 设计自适应律构成自适应模糊滑模控制器(AFSMC), 使模糊控制的输出值自适应逼近 ΔN . 对于式(38), 取 $k_i = \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)$ 为 Δn_i 的理想逼近, 则由万能逼近定理可知, $\exists \omega_i > 0$, 有

$$|\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)| \leq \omega_i. \quad (41)$$

针对自适应模糊滑模控制器, 定义李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2n} (\tilde{\theta}_{k_i}^T \tilde{\theta}_{k_i}), \quad (42)$$

其中 $\tilde{\theta}_{k_i} = \theta_{k_i} - \theta_{k_{id}}$, 则

$$k_i = \tilde{\theta}_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i) + \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i). \quad (43)$$

由此可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \\ \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - k_i) \right] - s^T As &+ \sum_{i=1}^{2n} \tilde{\theta}_{k_i}^T \dot{\tilde{\theta}}_{k_i} = \\ \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - \theta_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i)) \right] - & \\ s^T As + \sum_{i=1}^{2n} \tilde{\theta}_{k_i}^T \dot{\tilde{\theta}}_{k_i} &= \\ \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i) - \tilde{\theta}_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i)) \right] - & \\ s^T As + \sum_{i=1}^{2n} \tilde{\theta}_{k_i}^T \dot{\tilde{\theta}}_{k_i} &= \\ \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)) \right] - & \\ \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} \tilde{\theta}_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i) \right] - s^T As &+ \sum_{i=1}^{2n} \tilde{\theta}_{k_i}^T \dot{\tilde{\theta}}_{k_i} = \\ \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)) \right] - s^T As &+ \\ \sum_{i=1}^{2n} \left[- \frac{s_i}{m_i} \tilde{\theta}_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i) + \tilde{\theta}_{k_i}^T \dot{\tilde{\theta}}_{k_i} \right] &= \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)) \right] - s^T A s + \sum_{i=1}^{2n} \left[\hat{\theta}_{k_i}^T \left(-\frac{s_i}{m_i} \Psi_{k_i}(s_i) + \dot{\tilde{\theta}}_{k_i} \right) \right]. \quad (44)$$

因此,取自适应律为

$$\dot{\tilde{\theta}}_{k_i} = \frac{s_i}{m_i} \Psi_{k_i}(s_i), \quad (45)$$

则有

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)) \right] - s^T A s. \quad (46)$$

因此,存在很小的正实数 γ_i 使得

$$|\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)| \leq \omega_i \leq \gamma_i |s_i|, \quad (47)$$

其中 $0 < \gamma_i < 1$, 则有

$$\frac{s_i}{m_i} |\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)| \leq \frac{s_i}{m_i} \gamma_i |s_i| = \frac{\gamma_i}{m_i} s_i^2. \quad (48)$$

所以

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^{2n} \left[\frac{s_i}{m_i} (\Delta n_i - \theta_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)) \right] - s^T A s \leq \\ & \sum_{i=1}^{2n} \frac{\gamma_i}{m_i} s_i^2 - s^T A s = \sum_{i=1}^{2n} \frac{\gamma_i}{m_i} s_i^2 - \sum_{i=1}^{2n} a_i s_i^2 = \\ & \sum_{i=1}^{2n} \left(\frac{\gamma_i}{m_i} - a_i \right) s_i^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (49)$$

其中 $a_i > \gamma_i/m_i$.

由式(49)可知,当且仅当 $s = 0$ 时, $\dot{V} = 0$, 自适

应律(45)渐近收敛. 因此可得结论 $\lim_{t \rightarrow \infty} s = \lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{e} + \lambda e) = 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} q = q_d$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q} = \dot{q}_d$, 该控制器是全局渐近稳定的.

综上所述,结合式(36)、(40)、(45)可得TDE+AFSMC控制器为

$$\begin{cases} \tau = \bar{M}v + \hat{N}, \\ v = \ddot{q}_d + \lambda \dot{e} + As + \bar{M}^{-1}K, \\ k_i = \theta_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i), \\ \dot{\theta}_{k_i} = \dot{\tilde{\theta}}_{k_i} = \frac{s_i}{m_i} \Psi_{k_i}(s_i). \end{cases} \quad (50)$$

结合式(11)、(17)、(50)可得基于时间延时估计动力学模型以及自适应模糊滑模控制器(TDE+AFSMC)的双机械臂协同阻抗控制器为

$$\begin{cases} \tau_u = \\ \bar{M} \{ J^{-1} [\ddot{X}_d + M_d^{-1} [F_d - F_e + B_d (\dot{X}_d - \dot{X}) + K_d (X_d - X)] - \dot{J} \dot{q}_u] + \lambda \dot{e} + As + \bar{M}^{-1} K \} + \\ \tau_{u(t-L)} - \bar{M} \ddot{q}_{t-L}, \\ K = [k_1 \dots k_i \dots k_{2n}]^T, \\ k_i = \theta_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i), \\ \dot{\theta}_{k_i} = \dot{\tilde{\theta}}_{k_i} = \frac{s_i}{m_i} \Psi_{k_i}(s_i). \end{cases} \quad (51)$$

基于TDE+AFSMC的双臂协同阻抗控制结构框

图如图4所示.

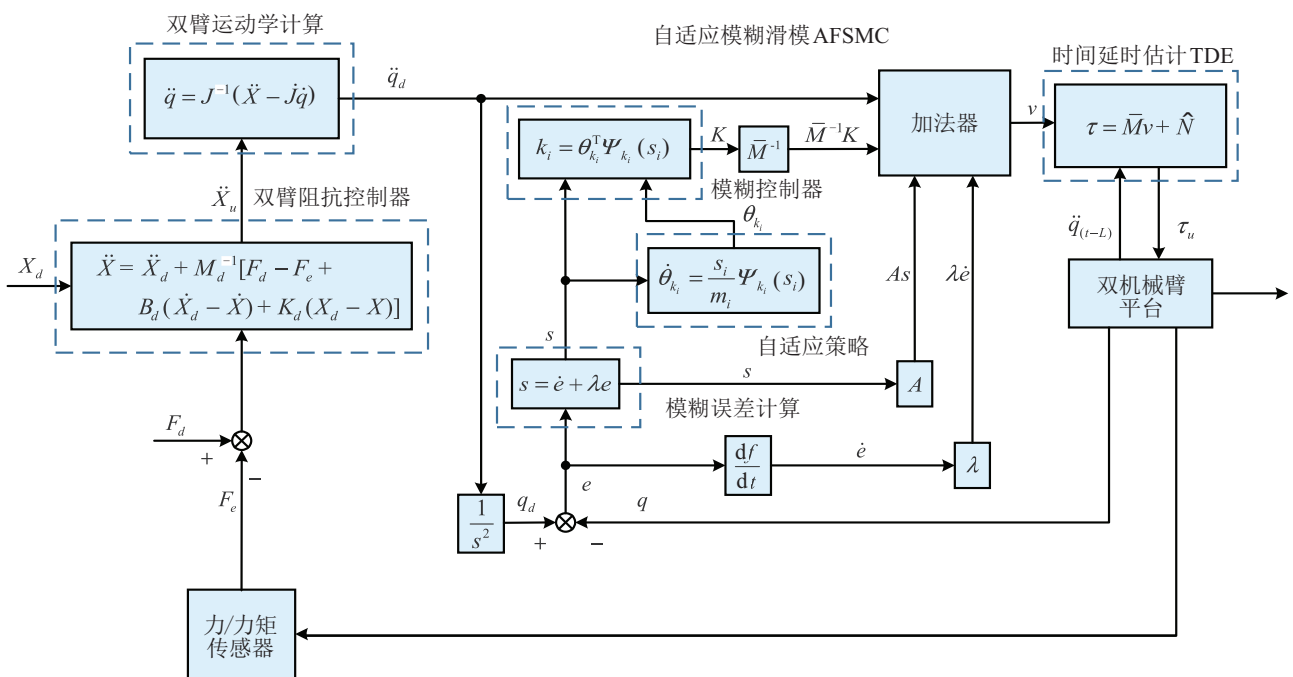


图4 基于TDE+AFSMC的双臂协同阻抗控制结构

4 仿真实验验证

为了验证本文提出的基于TDE+AFSMC的双臂协同阻抗控制算法,本文以Matlab/Simulink作为仿真实验平台,以ABB机械臂为模型,利用Robotics Toolbox工具箱及SIMMECHANICS插件,建立两台同型号六自由度工业机械臂模型,进行仿真实验验证.为了使两台机械臂各自的第1个关节受到更大的重力及扰动力的作用,便于分析控制算法的鲁棒性,在搭建机械臂仿真模型时,将两台机械臂平放安装,组成双机械臂协作系统如图5所示^[27-28].设机械臂各连杆的质量如表1所示,机械臂D-H参数如表2所示.

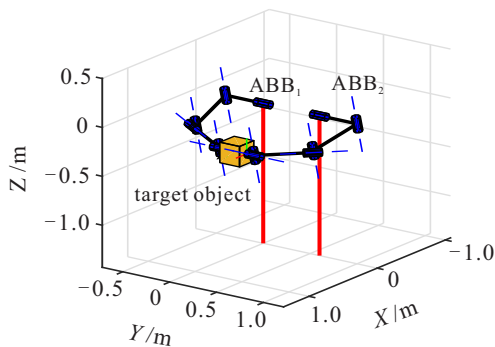


图5 双臂系统的Matlab建模

表1 机械臂各连杆质量设置

连杆	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
质量/kg	20	15	3	15	1	1

表2 机械臂D-H参数

θ	$\alpha/(^\circ)$	a/m	d/m
q_1	90	0	0.399 1
q_2	0	0.448	0
q_3	90	0.042	0
q_4	90	0	0.451
q_5	-90	0	0
q_6	0	0	0.5

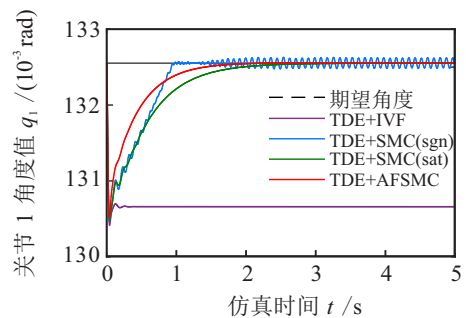
设空间中有一目标物体,其长度为 $l = 0.21\text{ m}$,在世界坐标系 y 轴的 $y = 0\text{ m}$ 和 $y = 0.6\text{ m}$ 处安装两台平放的ABB机械臂,分别为ABBrobot₁(以下简称为ABB₁)和ABBrobot₂(以下简称为ABB₂),如图5所示.两台机械臂在初始状态下,它们的末端间距为0.21 m,恰好与目标物体两端相接触.设重力加速度沿世界坐标系 z 轴负方向 $g = 9.8\text{ m/s}^2$.两个机械臂末端各自受到由目标物体重力提供的向下的反作用力和来自目标物体接触力的反作用力 $-F_e$.为了提高时间延时估计的准确性,采样周期应取尽可能小的值,在仿真环境中设置系统的仿真步长(即采样周期)为 $L = 0.005\text{ s}$,期望轨迹的插值周期也取0.005 s.

在仿真实验过程中,对TDE+AFSMC控制器的增益矩阵 \bar{M} 、 λ 、 A 进行整定,使得角位置、速度、加速度可以跟踪期望值且误差收敛.经过多次整定,最终确定惯性矩阵估计值为 $\bar{M} = \text{diag}(5, 2, 0.9, 0.5, 0.1, 0.5, 5, 2, 0.9, 0.5, 0.1, 0.5)$,期望速度反馈增益 $\lambda = \text{diag}(100, 100, 40, 100, 100, 40, 100, 100, 40, 100, 100, 40)$, $A = \text{diag}(2.5, 2, 1, 2, 3, 1, 2.5, 2, 1, 2, 3, 1)$,双臂阻抗控制器的刚度矩阵取 $K_d = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$,阻尼矩阵为 $B_d = \text{diag}(200, 200, 200, 200, 200, 200, 200, 200, 200, 200, 200, 200)$,惯性矩阵取 $M_d = \text{diag}(10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10)$.

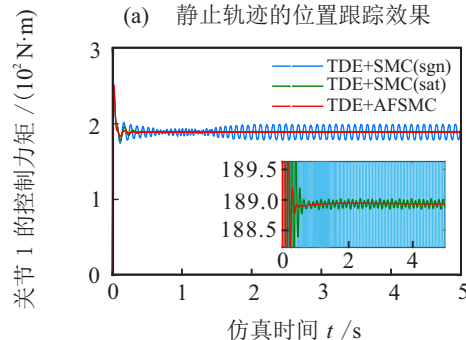
4.1 对比实验

根据式(26)、(27)、(32)、(50)设计对照实验,将上节的TDE+IVF、TDE+SMC(sgn)、TDE+SMC(sat)和TDE+AFSMC四种控制器进行仿真,以受到重力和负载扰动影响最明显的ABB₁机械臂的第1个关节为例,为该关节设置期望轨迹,进行对照实验,观察控制器的轨迹跟踪效果和输出控制力矩大小.

设系统初始状态控制力矩为0 N·m,为关节1设置一条静止5 s的期望轨迹,则TDE+IVF、TDE+SMC(sgn)、TDE+SMC(sat)以及TDE+AFSMC四种控制器的位置跟踪控制效果以及输出控制力矩如图6所示.下面为关节1设计一条以正弦函数运动的期望轨迹,观察4种控制器的角度位置跟踪控制效果和角速度跟踪控制效果如图7所示.这4种控制器的性能指标如表3所示.



(a) 静止轨迹的位置跟踪效果



(b) 静止轨迹的3种滑模控制器输出力矩

图6 不同控制器对关节1静止轨迹的控制效果

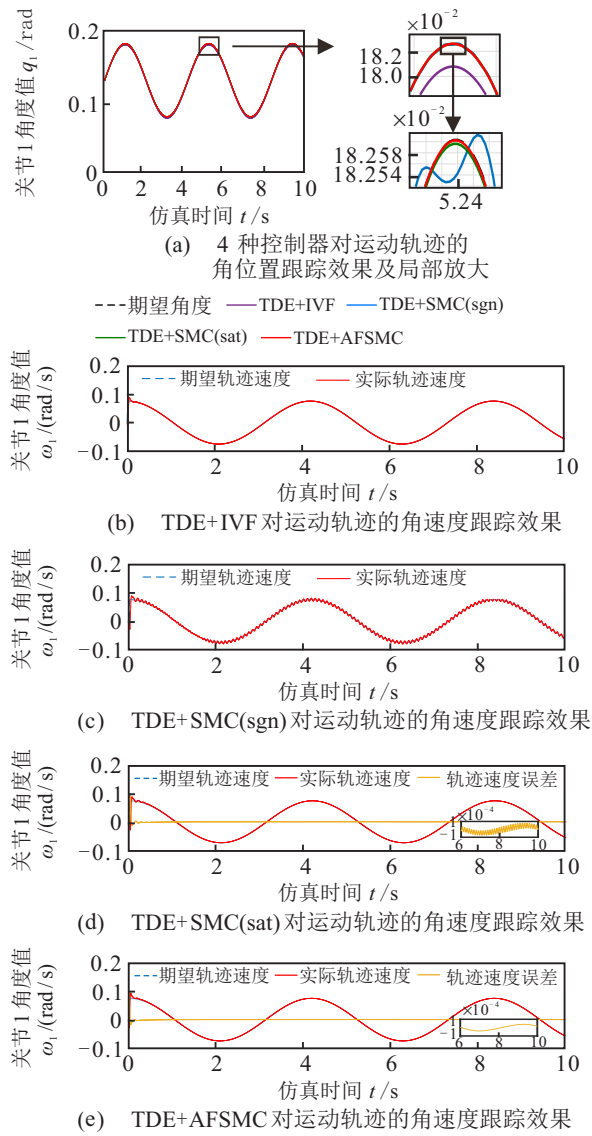


图7 不同控制器对关节1运动轨迹的控制效果

从图6可以看出,当关节1的期望轨迹是一条5s的静止轨迹时,由于受到重力影响,4种控制器控制下的关节1在初始时刻都发生了下落的现象.结合图7以及表3可以看出:TDE+IVF控制下的关节角度与期望角度之间总是存在稳态误差,约为 1.9×10^{-3} rad;基于符号函数的传统滑模控制器TDE+SMC(sgn)控制可以消除位置跟踪误差,调节时间为0.975s,但是关节角度在期望值附近会发生抖震现象,振幅约为 1.39×10^{-4} rad,且控制力矩也会有较大震荡,振幅为 $20.2 \text{ N}\cdot\text{m}$,角度和力矩的抖震频率均为11.111 Hz;基于饱和函数的滑模控制器TDE+SMC(sat)控制下的关节角度抖震得到有效抑制,振幅下降为 1.47×10^{-6} rad,但响应速度也随之变慢,调节时间为2.75s,达到稳态后输出的控制力矩同样也会震荡,振幅为 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$,角度和力矩的抖震频率均为8.696 Hz;基于自适应模糊滑模控制的TDE+AFSMC控制器的响应速度与sat滑模控制器相比有所提升,调节时间为1.705s,而关节角度及控制力矩均未发生震荡.由此可得,与TDE+IVF控制器相比,TDE+AFSMC控制器可以大幅度削减位置跟踪的稳态误差,实现对时间延时估计误差的补偿.同时,与传统的两种滑模控制器相比,该方法可以在消除抖震的同时获得较快的响应速度,能够取得更好的控制效果.

从图7可以看出:对于正弦形的运动的期望轨迹,TDE+IVF控制器的位置跟踪仍然有稳态误差,为 1.8×10^{-3} rad;TDE+SMC(sgn)控制器可以消除角度跟踪误差,但是经放大后发现角度跟踪仍然不能

表3 4种控制器对关节1静止轨迹的性能指标对比

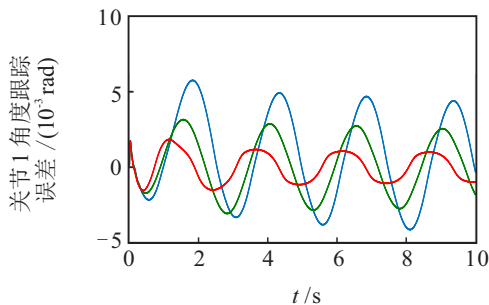
	TDE+IVF	TDE+SMC(sgn)	TDE+SMC(sat)	TDE+AFSMC
调节时间/s	—	0.975	2.755	1.705
稳态误差/rad	1.9×10^{-3}	—	—	8×10^{-6}
角度振幅/rad	0	1.39×10^{-4}	1.47×10^{-6}	0
角度抖震频率/Hz	0	11.111	8.696	0
力矩振幅/N·m	0	20.2	0.1	0
力矩抖震频率/Hz	0	11.111	8.696	0

表4 4种控制器对关节1运动轨迹的性能指标对比

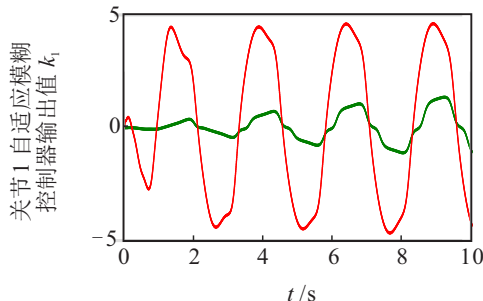
	TDE+IVF	TDE+SMC(sgn)	TDE+SMC(sat)	TDE+AFSMC
稳态误差/rad	1.8×10^{-3}	—	6.94×10^{-6}	8.17×10^{-7}
角度振幅/rad	0	8.56×10^{-5}	0	0
角度抖震频率/Hz	0	15.385	0	0
角速度振幅/(rad/s)	0	9.8×10^{-3}	6.94×10^{-5}	0
角速度抖震频率/Hz	0	11.111	8.333	0

达到稳定状态,角度跟踪的振幅为 8.56×10^{-5} rad, 抖震频率为 15.385 Hz, 角速度跟踪震荡更加明显, 振幅为 9.8×10^{-3} rad/s, 抖震频率为 11.111 Hz; TDE+SMC (sat) 控制器的角度跟踪抖震可以忽略不计, 角度跟踪的稳态误差为 6.94×10^{-6} rad, 但是通过观察实际角速度与期望角速度的误差值可以发现, 在初始状态以及稳定之后角速度跟踪仍然存在抖震现象, 振幅为 6.94×10^{-5} rad/s, 抖震频率为 8.333 Hz; 而 TDE+AFSMC 控制器的角速度跟踪在初始时刻振荡次数更少, 在稳定后可以完全消除角度和角速度的抖震, 角度跟踪的稳态误差缩小为 8.17×10^{-7} rad, 进一步优化了轨迹跟踪效果。

保持正弦运动的期望轨迹不变, 在 ABB₁ 机械臂的末端引入一个沿 z 轴方向时变的扰动力, 该扰动力的大小为 $F_{zd} = 500 \sin 2.5t$ N, 比较在该扰动力下 TDE+SMC (sat) 控制器和 TDE+AFSMC 的控制效果如图 8(a) 所示。在图 8 中: 蓝线表示 TDE+SMC (sat), 绿线表示 TDE+AFSMC (adaptive gain=1), 红线表示 TDE+AFSMC (adaptive gain = 50)。对比两种控制器可以明显看出, TDE+AFSMC 控制器的位置跟踪误差更小, 收敛性更好, 表明自适应模糊滑模可以更好地实现对机械臂动力学扰动因素的自适应逼近, 提升了机械臂的控制精度。



(a) TDE+SMC(sat)和TDE+AFSMC控制器的轨迹跟踪误差



(b) 不同增益下自适应模糊滑模控制器的输出值

图8 引入扰动后不同控制器对关节1运动轨迹的控制效果

由李雅普诺夫定理可知, 本文提出的自适应律是全局渐近稳定的, 但是在仿真实验中发现, 由于式(45)存在 $1/m_i$ 项, 使得模糊控制器的输出增长缓慢,

到达平衡状态的时间过长。因此, 可以考虑将式(45)乘以一个自适应增益 (adaptive gain) 再引入到模糊滑模控制器中, 增强自适应调控效果, 使模糊控制器输出更快达到平衡状态。对比图 8(a) 与图 8(b) 可以看出, 增大自适应增益可以提高自适应针对扰动信号的调整速度以及控制器对扰动的逼近精度, 进一步减少轨迹跟踪误差, 同时也验证了自适应控制对扰动的抵消作用。

4.2 双臂协同阻抗控制实验

本文最终目的是实现双机械臂搬运目标物体任务的协同阻抗控制。根据式(51)搭建基于 TDE+AFSMC 的双臂协同阻抗控制器, 并为仿真双臂系统设计一条夹紧和搬运目标物体的协作轨迹, 该轨迹分为 3 段: 先进行夹紧, 再进行圆形轨迹搬运, 最后进入静止状态, 观察基于 TDE+AFSMC 控制器的双臂协同阻抗控制器能否在实现轨迹跟踪的同时实现对接触力的控制。设目标物体重 50 N, 为保证在协作轨迹运行过程中目标物体不会滑落, 设每台机械臂的末端与目标物体的期望接触力为 $F_d^A = F_d^B = 15$ N, 实际接触力 F_e^A 和 F_e^B 的大小由安装在 ABB₁ 末端的接触力传感器实时测量得到, 在仿真平台中接触力传感器的测量数据可由式(14)和(15)计算得到。设目标物体和机械臂末端的接触刚度系数为 $K_e = 1000$ N/m。

设目标物体的期望圆形轨迹方程如下:

$$\begin{cases} x = 0.75 + 0.1 \sin t, \\ y = 0.3, \\ z = 0.1 \cos t. \end{cases} \quad (52)$$

该轨迹用时 20 s: 前 5 s 期望轨迹为静止不动, 仅利用阻抗控制环产生夹紧的动作以夹紧目标物体; 中间 10 s 的期望轨迹为式(52)所述的圆形轨迹, 在 xOz 平面内顺时针移动一圈, 属于匀加速-匀速-匀减速轨迹; 最后 5 s 为静止轨迹, 用于观察系统的稳态响应。经 Matlab 仿真后, TDE+AFSMC 双臂协同阻抗控制的实际控制效果如图 9 所示。

在双臂协同阻抗控制下, 两台机械臂各自的六个关节角度位移如图 9 所示。在图 9 中: 蓝线表示关节 1 角度, 红线表示关节 2 角度, 黄线表示关节 3 角度, 紫线表示关节 4 角度, 绿线表示关节 5 角度, 浅线表示关节 6 角度。双臂各关节控制力矩如图 10 所示。在图 10 中: 蓝实线表示关节 1 控制力矩, 蓝虚线表示关节 4 控制力矩, 红实线表示关节 2 控制力矩, 红虚线表示关节 5 控制力矩, 黄实线表示关节 3 控制力矩, 黄虚线表示关节 6 控制力矩。接触力控制效果如图 11 所示。

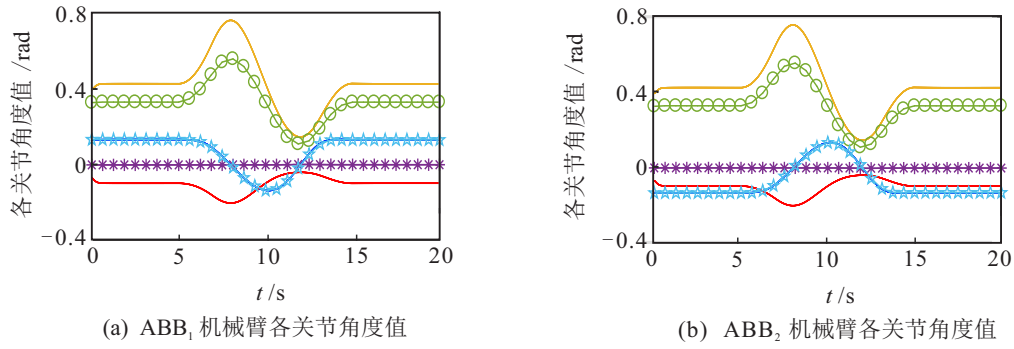


图9 双机械臂各关节角度值

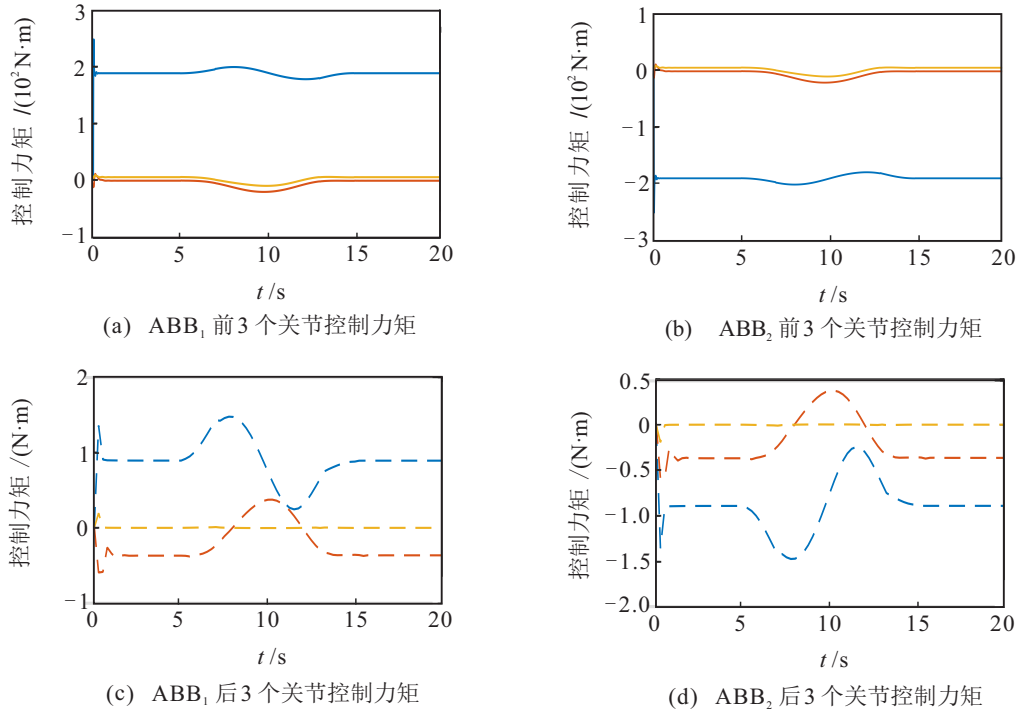


图10 双机械臂各关节控制力矩

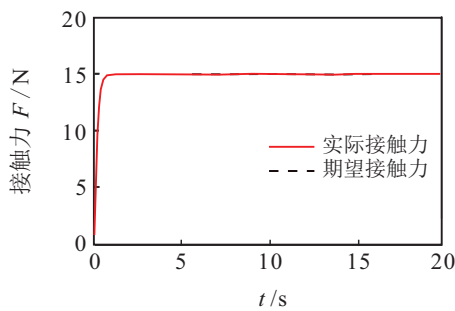


图11 阻抗控制器的接触力跟踪效果

在TDE+AFSMC控制器控制下,目标物体中心在 xOz 平面内的圆形轨迹跟踪效果如图12(a)所示.为了更直观地观察双臂系统对圆形期望轨迹的跟踪效果以及对期望接触力的响应过程,双臂系统的两个机械臂末端在空间中的行进轨迹如图12(b)所示.

由图10可知,在双臂系统上电的瞬间,TDE+AFSMC控制器迅速作出响应以抵抗重力,以 ABB_1 机械臂为例,在上电时关节1的控制力矩最大.当 $t =$

0.025 s时,关节1控制力矩取得最大值249.1 N·m,在 $t = 0.35$ s时控制力矩为188.9 N·m并保持稳定,最大转矩约为额定转矩的1.32倍,因此可以初步判定系统各关节伺服电机在开机运行时未出现过载现象.在整个运行过程中,关节4虽然没有发生任何位移,但是其他关节移动导致机械臂姿态改变,控制器控制关节4的伺服电机输出足够的力矩以维持双臂系统的稳定.

从图11中可以看出,由于初始状态下目标物体长度与双臂末端间距相同,目标物体受力为0 N,此时阻抗控制器很快便开始进行接触力调节,大约在 $t = 1.07$ s时,实际接触力达到期望值15 N.

从图12(a)中可以看出,在估计动力学模型的驱动下,系统能够夹持目标物体完成圆形轨迹.从图12(b)可以看出,双臂在初始阶段时,虽然期望轨迹没有任何位移,但是由于接触力未达到期望值,双臂末端在协同阻抗控制器作用下,首先进行同时夹紧目

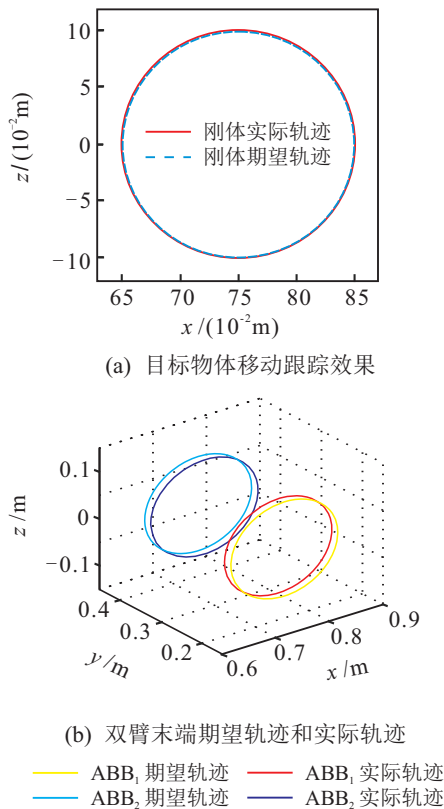


图12 TDE+AFSMC双臂协同阻抗控制效果

标物体的动作,使接触力达到期望值15N;在进行圆轨迹运动时,双臂末端始终保持合适的间距以保持接触力为15N,并持续到协作任务结束.由此可得,在TDE+AFSMC控制器生成的控制力矩作用下,双臂系统可以完成对期望圆形轨迹的跟踪,双臂协调阻抗控制器可以在圆形轨迹行进过程中快速响应以维持机械臂末端与目标物体之间的期望接触力.

5 结论

本文针对双机械臂协作搬运目标物体的任务,提出了一种基于时间延时估计结合自适应模糊滑模控制的机械臂动力学控制算法.在此基础上,将该算法与双臂协同阻抗控制相结合,用于实现双机械臂夹取及搬运目标物体时的末端轨迹控制以及接触力控制.经仿真实验验证,自适应模糊滑模控制能够在一定程度上补偿由时间延时估计造成的估计误差和不确定性扰动因素,修正角度跟踪的稳态误差,提升系统的鲁棒性.与传统的滑模控制器相比,该控制器消除了抖震,具有更快的响应速度、控制精度以及稳态性能.基于此算法的双臂协同阻抗控制器能够完成对目标物体期望轨迹的跟踪控制,同时又能满足双臂末端与目标物体期望接触力的要求,可以实现双臂协作夹取和搬运目标物体的动作,提高了双臂系统响应速度和稳定性,使系统具有良好的动态性能和稳态性能.为了简化仿真,验证控制器的控制效果,本文直接

设期望接触力为15N,没有考虑在末端夹取姿势不在水平面以及目标物体移动的加速度对双臂末端接触力以及摩擦力造成的影响,下一步可以全面分析双臂动力学模型,完善双臂协作系统夹取目标物体的动力学建模.

参考文献(References)

- [1] Wang T C, Tong S C. Adaptive inverse control of cable-driven parallel system based on type-2 fuzzy logic systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(5): 1803-1816.
- [2] Cui X, Chen W H, Jin X, et al. Design of a 7-DOF Cable-Driven Arm Exoskeleton (CAREX-7) and a controller for dexterous motion training or assistance[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1): 161-172.
- [3] Wang Y, Wang S, Wei Q P, et al. Development of an underwater manipulator and its free-floating autonomous operation[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(2): 815-824.
- [4] Mao Y, Jin X, Dutta G G, et al. Human movement training with a cable driven arm exoskeleton (CAREX)[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2015, 23(1): 84-92.
- [5] Song P, Yu Y Q, Zhang X P. A tutorial survey and comparison of impedance control on robotic manipulation[J]. Robotica, 2019, 37(5): 1-36.
- [6] Qu J D, Zhang F H, Wang Y, et al. Human-like coordination motion learning for a redundant dual-arm robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 379-390.
- [7] Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation[C]. 1984 American Control Conference. San Diego: IEEE, 1984: 304-313.
- [8] Bonilla I, Reyes F, Mendoza M, et al. A dynamic-compensation approach to impedance control of robot manipulators[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 63(1): 51-73.
- [9] He J, Luo M, Zhang Q. Dual impedance control with variable object stiffness for the dual-arm cooperative manipulators[C]. 2016 Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). Tokyo: IEEE, 2016: 102-108.
- [10] Hsia T C S, Lasky T A, Guo Z. Robust independent joint controller design for industrial robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1991, 38(1): 21-25.
- [11] Jin M L, Kang S H, Chang P H. Robust compliant motion control of robot with nonlinear friction using time-delay estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial

- Electronics, 2008, 55(1): 258-269.
- [12] Lee J, Chang P H, Jamisola R S. Relative impedance control for dual-arm robots performing asymmetric bimanual tasks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3786-3796.
- [13] Jin M L, Jin Y, Chang P H, et al. High-accuracy tracking control of robot manipulators using time delay estimation and terminal sliding mode[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2011, 8(4): 65-78.
- [14] Lee J, Chang P H, Jin M L. Adaptive integral sliding mode control with time-delay estimation for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6796-6804.
- [15] Zhong Y G, Yang F. Dynamic modeling and adaptive fuzzy sliding mode control for multi-link underwater manipulators[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 1-11.
- [16] Huang B, Li Z J, Wu X Y, et al. Coordination control of a dual-arm exoskeleton robot using human impedance transfer skills[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(5): 954-963.
- [17] Yan L, Xu W F, Hu Z H, et al. Virtual-base modeling and coordinated control of a dual-arm space robot for target capturing and manipulation[J]. Multibody System Dynamics, 2019, 45(4): 431-455.
- [18] 张海涛, 唐立才, 张敬鹏, 等. 空间机械臂双臂协调操作路径规划算法[J]. 控制工程, 2015, 22(6): 1028-1033.
(Zhang H T, Tang L C, Zhang J P, et al. Research on dual-arm coordinated path planning for space manipulator[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(6): 1028-1033.)
- [19] Ren Y, Chen Z S, Liu Y C, et al. Adaptive hybrid position/force control of dual-arm cooperative manipulators with uncertain dynamics and closed-chain kinematics[J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 2017, 354(17): 7767-7793.
- [20] Pliego-Jimenez J, Arteaga-Perez M, Sanchez-Sanchez P. Dexterous robotic manipulation via a dynamic sliding mode force/position control with bounded inputs[J]. IET Control Theory and Applications, 2019, 13(6): 832-840.
- [21] Caccavale F, Chiacchio P, Marino A, et al. Six-DOF impedance control of dual-arm cooperative manipulators[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(5): 576-586.
- [22] Xu D G, Shen T T, Xie Y F. Robot visual servoing control[M]. Changsha: Central South University Press, 2018: 1-182.
- [23] Soltanpour M R, Khooban M H, Otadolajam P. Robust control strategy for electrically driven robot manipulators: Adaptive fuzzy sliding mode[J]. Iet Science Measurement & Technology, 2015, 9(3): 322-334.
- [24] Wang Y Y, Yan F, Jiang S R, et al. Time delay control of cable-driven manipulators with adaptive fractional-order nonsingular terminal sliding mode[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 121: 13-25.
- [25] Baek J, Kwon W, Kim B, et al. A widely adaptive time-delayed control and its application to robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5332-5342.
- [26] Hu S B. Sliding mode control for nonlinear multi joint robot system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 1-166.
- [27] Craig J J. Introduction to robotics: Mechanics and control[M]. Beijing: China Machine Press, 1955: 1-322.
- [28] Corke P. Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in Matlab[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 1-542.

作者简介

李德昀(1996—), 男, 硕士生, 从事双机械臂控制技术的研究, E-mail: 0901130122@csu.edu.cn;

徐德刚(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人、嵌入式系统、信号处理与智能控制等研究, E-mail: dgxu@csu.edu.cn;

桂卫华(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事复杂有色金属生产过程控制理论、技术和工程应用等研究, E-mail: gwh@mail.csu.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)