

引文格式: 王君, 何长智. 非结构化干扰下机械臂自适应非奇异快速终端滑模控制[J]. 航空制造技术, 2025, 68(13): 22-30.

WANG Jun, HE Changzhi. Adaptive non-singular fast terminal sliding mode control of robotic arm under unstructured disturbances[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(13): 22-30.

非结构化干扰下机械臂自适应非奇异快速终端滑模控制

王君, 何长智

(兰州理工大学, 兰州 730050)

[摘要] 针对实际应用中的建模误差和未知外界扰动对机械臂系统轨迹跟踪精度的影响,设计了一种基于非线性干扰观测器的自适应非奇异快速终端滑模控制策略(ANFTSMC-DO)。首先,设计了非线性干扰观测器在线估计干扰信息,并通过选取的适当非线性增益函数,使估计误差按指数规律快速收敛。其次,采用自适应非奇异快速终端滑模控制器应对参数变化和未建模的动态特性,避免系统性能随时间衰减。同时在保证鲁棒稳定性和控制精度的前提下,使得所提方法有效抑制了抖振现象,可以更好地抵御外界扰动的影响。最后,通过仿真验证了该方法在误差收敛速度以及控制精度上的显著优势,增强系统鲁棒性的同时实现了更高的跟踪精度。

关键词: 机械臂; 非奇异快速终端滑模控制; 非线性干扰观测器; 自适应控制; 有限时间收敛

中图分类号: V26; TP241

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.13.022



王君

教授, 博士, 研究方向为动态系统的故障诊断与容错控制、工业过程先进控制理论与应用。

目前,工业自动化^[1]和智能制造技术迅速发展,机械臂作为重要的自动化设备,正逐渐在多个行业中发挥着越来越关键的作用。尤其是在制造业、医疗行业、航空航天等精度要求高的领域^[2],机械臂的应用日益广泛。随着技术要求的提升,机械臂系统需要在各种复杂环境下稳定运行,能够准确执行复杂的操作任务。然而,在实际应用中,机械臂控制系统常面临建模误差和未知环境干扰的挑战,尤其是在轨迹跟踪任务中,需要更加复杂的控制策略和精确的动力学模型来确保系统的稳定性和精度^[3]。这对机械臂控制系统的鲁棒性和抗干扰能力提出了更高的要求。

针对机械臂在复杂环境中的作业,近年来,为实现高精度跟踪性能,国内外学者提出了许多行之有效的控制方法,如模糊控制^[4]、非线性反馈

控制^[5]、自适应控制^[6]和滑模控制^[7]等。滑模控制(Sliding mode control, SMC)作为一种鲁棒控制策略,因设计简便、响应迅速、稳态精度高而受到广泛关注,其核心思想是通过非线性反馈与切换控制,使系统状态轨迹驱动并保持在预设的滑动面上。滑模控制适用于具有不确定性和外部扰动的系统,在理想条件下,滑模控制能够使系统在运动中对这些扰动不敏感,具有较强的抗干扰能力。

Tang^[8]提出了终端滑模控制(TSMC)算法,通过调整控制律,显著加快了跟踪误差的收敛速度,实现有限时间内的收敛。但是机械臂系统不仅跟踪误差大,且趋于稳定的速度较慢。为解决这个问题, Yan等^[9]针对微电子机械系统在未知模型不确定性和外部干扰下的振动陀螺仪跟踪控制问题,提出一种自适应全局快

速终端滑模控制 (AFTSMC) 方法, 所提出的算法可以估计外界干扰, 有效降低跟踪误差。但这种方法在设计过程中可能会遇到奇异性问题, 这对系统的性能及其稳定性有一定影响。为了消除系统奇异性问题, 徐宝珍等^[10]提出了一种非奇异终端滑模控制 (NTSMC) 算法, 在有限时间控制框架下, 该算法虽显著提升了机械臂末端轨迹的跟踪性能, 但未考虑系统对快速性的需求。吴定会等^[11]基于快速终端滑模控制 (FTSMC) 方法, 提出了一种改进的固定时间滑模控制策略, 设计了具备固定时间收敛特性的滑模面。尽管该方法改善了控制性能, 但并未彻底解决快速终端滑模面固有的非奇异性问题。Su 等^[12]根据不确定性机械臂的全局有限时间跟踪理论, 给出了一种消除奇异性的积分滑模面和终端滑模的方式, 从而保证了其轨迹追踪效果的全局收敛性。为适应不确定性系统的影响, 通常会采用较高的切换增益。然而, 这种方式容易在切换过程中引发高频抖振现象, 影响系统的平稳性和控制精度。文献 [13-17] 针对实际应用中可能存在的系统在面对外界干扰或系统参数不确定性的情况, 提出了一种新的自适应非奇异快速终端滑模控制 (NFTSMC) 方法, 通过改进控制算法, 显著降低了系统的固有抖振, 但是系统控制器的设计通常依赖于系统不确定性的先验知识, 所以实际应用中, 系统的不确定性扰动往往难以预估。另有一些研究则是将干扰观测器与滑模控制结合, 增强了系统的抗干扰能力。如, 文献 [18] 由于观测器设计较为复杂, 导致计算负担较大, 其预定时间滑模控制方法虽然实现了有限时间内的收敛, 但在高频动态控制中仍然存在较大抖振, 抑制效果有限。相较而言, 文献 [19] 中非线性终端滑模控制结合干扰观测器, 提升了系统的鲁棒性, 但在应对小扰动时仍存在抖振问题。分数阶控制

对参数的依赖性较高, 且在不同环境下需频繁调整参数, 适应性较差。

因此, 本文提出了一种基于干扰观测器的新型自适应非奇异快速终端滑模控制策略 (ANFTSMC-DO)。

(1) 针对系统未知干扰上限, 提出了一种基于自适应估计的控制律, 因此不需要已知的不确定性上限。当系统存在较大初始偏差或扰动的情况下, 能够更快地减少误差, 从而提升系统性能。

(2) 所设计的控制器有效解决了系统奇异性问题, 确保其在控制过程中能够平稳运行, 同时使位置和速度跟踪误差在有限时间内收敛为零。该策略不仅有效提升了系统的收敛速度, 也显著改善了瞬态响应性能, 使得系统能够更快达到稳定状态。

(3) 在滑模控制器的基础上引入干扰观测器, 通过对观测器参数的优化设计, 使其误差呈指数性收敛。两者相结合有效降低了外界干扰和系统不确定性对机械臂控制效果的影响, 在抑制系统抖振的同时, 实现了各关节对目标轨迹的快速、精确跟踪。

1 机械臂动力学建模

基于 Lagrange 方程建立机械臂动力学模型:

$$\begin{cases} L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = k(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - p(\mathbf{q}) \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = u_i, (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为拉格朗日函数; 关节角度为 \mathbf{q} ; 关节角速度为 $\dot{\mathbf{q}}$; 机械臂系统总动能为 $k(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$; 系统总势能为 $p(\mathbf{q})$; 关节驱动力矩为 u_i ($i=1, 2, \dots, n$)。

将式 (1) 简化, 则 n 连杆机器人机械臂的动力学方程可表示为

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d} \quad (2)$$

式中, $M(\mathbf{q}) = M_0(\mathbf{q}) + \Delta M(\mathbf{q})$ 为不定惯性矩阵, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = C_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) +$

$\Delta C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为离心力和哥氏力矩阵, $G(\mathbf{q}) = G_0(\mathbf{q}) + \Delta G(\mathbf{q})$ 为作用在关节上的重力项矢量, $M_0(\mathbf{q})$ 、 $C_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $G_0(\mathbf{q})$ 表示标量值, $\Delta M(\mathbf{q})$ 、 $\Delta C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\Delta G(\mathbf{q})$ 分别表示惯性矩阵建模误差、离心力和哥氏力矩阵误差、引力项的误差。 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{R}^n$ 为关节扭矩输入矢量, $\mathbf{d} \in \mathbf{R}^n$ 为外部扰动扭矩矢量。 \mathbf{q} 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 、 $\ddot{\mathbf{q}} \in \mathbf{R}^n$ 分别为关节角度、角速度和角加速度矢量。 \mathbf{R}^n 、 $\mathbf{R}^{n \times n}$ 均为欧氏空间。则可式 (2) 改写为

$$M_0(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + G_0(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \quad (3)$$

式中, $f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} - M_0(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} - C_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - G_0(\mathbf{q})$ 为系统集总扰动, 包括外部扰动和系统扰动。

考虑到控制器设计要求, 为实现后续控制策略提出如下假设:

假设 1: $M(\mathbf{q})$ 是一个正定对称矩阵, 存在其逆 $M^{-1}(\mathbf{q})$, 且惯性矩阵 $M(\mathbf{q})$ 和 $M^{-1}(\mathbf{q})$ 对所有 \mathbf{q} 都是有界的, 即存在 M_{\min} 和 M_{\max} , 使得下式成立:

$$0 < M_{\min} < M(\mathbf{q}) < M_{\max}$$

假设 2: 定义集总扰动为 $f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$, 满足 $f \leq \mu_1 + \mu_2 \|\mathbf{q}\| + \mu_3 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2$, 其中参数 μ_1, μ_2, μ_3 为未知的正常数。

令 $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}$, $\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}$, 系统动力学方程可通过状态空间形式描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = M^{-1}(\mathbf{x}_1)(\boldsymbol{\tau} - C(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 - G(\mathbf{x}_1)) + fM^{-1}(\mathbf{x}_1) \\ \mathbf{y} = \mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (4)$$

2 改进型干扰观测器设计

根据机械臂的数学模型, 引入干扰观测器, 可以对系统中的扰动进行逼近, 从而有效减小扰动误差, 使其逐渐趋近于零。确保了系统在复杂环境下的鲁棒性与稳定性。基于此, 机械臂干扰观测器设计为

$$\dot{\hat{\mathbf{f}}} = L(\mathbf{x}_1)(M(\mathbf{x}_1)\dot{\mathbf{x}}_2 + C(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + G(\mathbf{x}_1) - \boldsymbol{\tau}) - L(\mathbf{x}_1)\hat{\mathbf{f}} \quad (5)$$

而式(5)所示非线性干扰观测器存在依赖于对加速度 \dot{x}_2 的测量的问题。然而,精确的加速度测量在许多机器人系统中是难以实现的。此外,该观测器还要求机器人动力学方程中的正定惯性矩阵 $M(\mathbf{x}_1)$ 满足某种特定的形式,即

$$M(\mathbf{x}_1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \bar{M}(\mathbf{x}_1) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

还需满足:

$$\bar{M}(\mathbf{x}_1) = \begin{bmatrix} m_1 - 2m_2 + m_3 & m_2 - m_3 + A \cos(q_2) \\ m_2 - m_3 + A \cos(q_2) & m_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, m_1 、 m_2 、 m_3 、 A 是惯性参数,分别与机械臂的质量、电机与末端负载以及关节长度有关。基于此,本文依据机械臂模型,设计了一种改进的非线性干扰观测器:

$$\begin{cases} \dot{\Theta} = L(\mathbf{x}_1)(C(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + G(\mathbf{x}_1) - \tau) - L(\mathbf{x}_1)\hat{f} \\ \hat{f} = \Theta + \lambda(\mathbf{x}_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $L(\mathbf{x}_1) = \text{diag}\{L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1n}\} > 0$ 为非线性增益矩阵, $\lambda(\mathbf{x}_2)$ 为待设计的非线性函数, Θ 定义为辅助参数向量。分别取

$$\begin{cases} L(\mathbf{x}_1) = \mathbf{X}^{-1}M^{-1}(\mathbf{x}_1) \\ \lambda(\mathbf{x}_2) = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{x}_2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, \mathbf{X} 为可逆矩阵,令

$$\dot{\lambda}(\mathbf{x}_2) = L(\mathbf{x}_1)M(\mathbf{x}_1)\dot{\mathbf{x}}_2 \quad (10)$$

定义 \hat{f} 为 f 的估计值,则干扰观测器误差定义为

$$\mathbf{E} = f - \hat{f} \quad (11)$$

则由式(8)、式(9)共同构成了改进型非线性干扰观测器,在实际应用中,由于缺乏干扰微分的已有认知,通常假定干扰相对于观测器的变化较为缓慢。即

$$\dot{f} = 0 \quad (12)$$

定理1:针对具有未知扰动的非线性系统(式(3)),在改进型非线性干扰观测器(式(8))的作用下,当选择合适的观测器增益 $L(\mathbf{x}_1)$ 时,使得观测误差逐渐逼近未知扰动,则所设计的非线性干扰观测器能使系统状态的估计误差指数性收敛至零。

即系统状态和估计状态都随着时间 t 的增加而趋于稳定。且通过适当调节观测器增益 $L(\mathbf{x}_1)$,不仅能实现对未知扰动的精确估计,还能保证系统的全局稳定性。

证明:构建如下Lyapunov函数。

$$V_{\text{do}} = \mathbf{E}^T \mathbf{X}^T M(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{E} \quad (13)$$

式中, $M(\mathbf{x}_1) = M(\mathbf{x}_1)^T > 0$ 。对式(13)求导得

$$\dot{V}_{\text{do}} = \dot{\mathbf{E}}^T \mathbf{X}^T M(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{E} + \mathbf{E}^T \mathbf{X}^T \dot{M}(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{E} + \mathbf{E}^T \mathbf{X}^T M(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \dot{\mathbf{E}} \quad (14)$$

根据式(9)可得

$$\dot{\mathbf{E}} = \dot{f} - \dot{\hat{f}} = \dot{f} - \dot{\Theta} - \dot{\lambda}(\mathbf{x}_2) = \dot{f} - M(\mathbf{x}_1) \mathbf{E} \quad (15)$$

则误差动态方程为

$$\dot{\mathbf{E}} + M(\mathbf{x}_1) \mathbf{E} = \dot{f} \quad (16)$$

由式(13)可得

$$\dot{\mathbf{E}} + M(\mathbf{x}_1) \mathbf{E} = 0 \quad (17)$$

从而得到

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{E}} = -\mathbf{X}^{-1}M^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{E} \\ \dot{\mathbf{E}}^T = -\mathbf{E}^T M^{-1}(\mathbf{x}_1) \mathbf{X}^{-T} \end{cases} \quad (18)$$

对式(14)简化可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{do}} &= \dot{\mathbf{E}}^T \mathbf{X}^T M(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{E} + \mathbf{E}^T \mathbf{X}^T \dot{M}(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{E} + \\ &\mathbf{E}^T \mathbf{X}^T M(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \dot{\mathbf{E}} = -\mathbf{E}^T \mathbf{X} \mathbf{E} + \\ &\mathbf{E}^T \mathbf{X}^T M(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{E} - \mathbf{E}^T \mathbf{X}^T \mathbf{E} = \\ &-\mathbf{E}^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}^T M(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} + \mathbf{X}^T) \mathbf{E} \end{aligned} \quad (19)$$

要保证 $\dot{V}_{\text{do}} < 0$ 为负定的,假设存在一个正定矩阵 $\Pi > 0$,满足:

$$\mathbf{X} - \mathbf{X}^T M(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \geq \Pi \quad (20)$$

成立,则存在 Π' ,当满足 $\Pi' > 0$ 时,有

$$\dot{V}_{\text{do}} \leq -\mathbf{E}^T \Pi \mathbf{E} = -\Pi' V_{\text{do}} \quad (21)$$

可知,干扰观测器呈指数收敛。在不等式(21)两边分别乘以 \mathbf{X}^{-T} 、 \mathbf{X}^{-1} ,得到

$$\mathbf{X}^{-T} + \mathbf{X}^{-1} - \mathbf{X}^{-T} \Pi \mathbf{X}^{-1} \geq \dot{M}(\mathbf{x}_1) \quad (22)$$

由于 $\|\dot{M}(\mathbf{x}_1)\| \leq \psi$,则 $\dot{M}(\mathbf{x}_1) \leq \psi \mathbf{I}$ (\mathbf{I} 为单位矩阵),经过变换以后的不等式为

$$\mathbf{X}^{-T} + \mathbf{X}^{-1} - \mathbf{X}^{-T} \Pi \mathbf{X}^{-1} - \psi \mathbf{I} \geq 0 \quad (23)$$

根据Schur补引理:假设 \mathbf{C} 为正定矩阵,则等价于

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{C} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (24)$$

同理,由式(24)可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{-T} + \mathbf{X}^{-1} - \psi \mathbf{I} & \mathbf{X}^{-T} \\ \mathbf{X}^{-1} & \Pi^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (25)$$

则可根据式(25)的形式,求解出 \mathbf{X} 。

3 自适应NFTSMC控制器设计

本文提出了一种自适应控制策略,该策略能够在未预先确定系统不确定性和外部扰动上限的情况下,对系统的不确定性进行有效估计,结合滑模控制以实现快速收敛和达到理想的跟踪精度^[20-21]。定义期望的位置轨迹并设计适当的反馈控制率,机械臂关节跟踪误差为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_1 = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d \\ \mathbf{e}_2 = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d \end{cases} \quad (26)$$

式中, \mathbf{q}_d 、 $\dot{\mathbf{q}}_d$ 分别为关节角期望角度和期望的角加速度,机械臂系统控制如图1所示。

根据机械臂系统状态空间方程式(4),则系统的误差动态可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_2 \\ \dot{\mathbf{e}}_2 = \Lambda_1(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) + \Lambda_2(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) + M_0^{-1}(\mathbf{q})\tau \end{cases} \quad (27)$$

式中,

$$\begin{cases} \Lambda_1(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = -M_0^{-1}(\mathbf{q})(C_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + G_0(\mathbf{q})) - \ddot{\mathbf{q}}_d \\ \Lambda_2(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = M_0^{-1}(\mathbf{q})(f - \Delta M \dot{\mathbf{q}} - \Delta C \dot{\mathbf{q}} - \Delta G) \end{cases}$$

\mathbf{e}_1 为轨迹跟踪误差; \mathbf{e}_2 为轨迹跟踪误差随时间变化率。为了有效消除系统中的奇异性问题,并确保系统能够在有限时间内收敛,设计滑模面函数为

$$s(t) = \mathbf{e}_1 + \varphi_1 |\mathbf{e}_1|^\alpha \text{sign}(\mathbf{e}_1) + \varphi_2 |\mathbf{e}_2|^\beta \text{sign}(\mathbf{e}_2) \quad (28)$$

式中, φ_1 、 φ_2 为正常数, α 、 β 分别满足 $1 < \beta < 2$ 和 $\alpha > \beta$, sign 为符号函数。由

$$\frac{d}{dt}(\text{sign}(\boldsymbol{\kappa})^\alpha) = \alpha |\boldsymbol{\kappa}|^{\alpha-1} \dot{\boldsymbol{\kappa}} (\alpha \geq 1)$$

定义向量 $\text{sign}(\boldsymbol{\kappa})^\alpha \in \mathbf{R}^n$ 如下。

$$\text{sign}(\boldsymbol{\kappa})^\alpha = |\boldsymbol{\kappa}|^\alpha \text{sign}(\boldsymbol{\kappa}) =$$

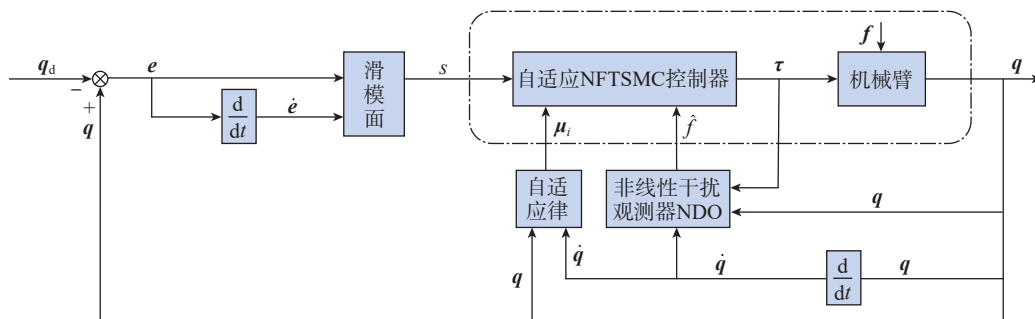


图1 机械臂系统控制流程图

Fig.1 Robotic arm system control flowchart

$$[|\kappa_1|^{\alpha} \text{sign}(\kappa_1), \dots, |\kappa_n|^{\alpha} \text{sign}(\kappa_n)]^T \quad (29)$$

机械臂系统在任何给定的初始条件 $e_1(0) = e_0 \neq 0$ 下, 系统状态均可在有限时间内快速收敛为 $e_1 = 0$, 当系统状态在离平衡点较远时, 机械臂收敛速度主要由滑模面函数中的 $\varphi_1 |e_1|^{\alpha} \text{sign}(e_1)$ 起作用, 当系统状态接近平衡点时, 子项 $\varphi_2 |e_2|^{\beta} \text{sign}(e_2)$ 能够大幅缩短系统达到稳定状态的时间, 使系统在应对复杂环境或突发干扰时, 迅速恢复到预期的轨迹或平衡点。对式(28)求导得:

$$\dot{s}(t) = e_2 + \alpha \varphi_1 |e_1|^{\alpha-1} e_2 + \beta \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} \dot{e}_2 \quad (30)$$

通过式(3)、式(26)和所选滑模面, 控制器设计为

$$\tau = \tau_{\text{eq}} + \tau_{\text{sw}} \quad (31)$$

式中, τ_{eq} 是机械臂系统到达滑模面 $s = \dot{s} = 0$ 时得到的等效控制律, τ_{sw} 是一种切换控制律, 旨在减少系统建模误差和外界干扰对系统控制效果的影响。

将式(27)代入到式(30)中得到等效控制率 τ_{eq} 为

$$\tau_{\text{eq}} = M_0(q)\ddot{q}_d + C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) - \hat{f} - \frac{1}{\beta \cdot \varphi_2} M_0(q) |e_2|^{2-\beta} (1 + \alpha \cdot \varphi_1 |e_1|^{\alpha-1}) \text{sign}(e_2) \quad (32)$$

为了估计系统不确定性和外部干扰的未知上限, 将自适应切换控制率设计为

$$\tau_{\text{sw}} = -M_0(q)(\mathfrak{D} \cdot s + (\hat{\mu}_1 + \hat{\mu}_2 |q| + \hat{\mu}_3 |\dot{q}|^2 + \gamma) \text{sign}(s)) \quad (33)$$

式中, γ 定义为一个很小的常数, \mathfrak{D} 为

正定增益矩阵, $\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \hat{\mu}_3$ 分别是 μ_1, μ_2, μ_3 的估计值。系统总的控制律设计为

$$\tau = \tau_{\text{eq}} + \tau_{\text{sw}} = M_0(q)\ddot{q}_d + C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) - \hat{f} - \frac{1}{\beta \cdot \varphi_2} M_0(q) |e_2|^{2-\beta} (1 + \alpha \cdot \varphi_1 |e_1|^{\alpha-1}) + \text{sign}(e_2) - M_0(q) (\mathfrak{D} \cdot s + (\hat{\mu}_1 + \hat{\mu}_2 |q| + \hat{\mu}_3 |\dot{q}|^2 + \gamma) \text{sign}(s)) \quad (34)$$

通过将自适应误差定义为 $\tilde{\mu}_i = \mu_i - \hat{\mu}_i, \tilde{\mu}_2 = \mu_2 - \hat{\mu}_2, \tilde{\mu}_3 = \mu_3 - \hat{\mu}_3$ 。根据系统状态误差和滑模面信息来自动调整控制器的增益, 设计自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mu}}_1 = \varpi_1 |s| \cdot |e_2|^{\beta-1} \\ \dot{\hat{\mu}}_2 = \varpi_2 |s| \cdot |e_2|^{\beta-1} |q| \\ \dot{\hat{\mu}}_3 = \varpi_3 |s| \cdot |e_2|^{\beta-1} |\dot{q}|^2 \end{cases} \quad (35)$$

所设计的自适应律中, $\varpi_1, \varpi_2, \varpi_3$ 为实际的参数。通过自适应律调节, 系统在面对未知外部干扰或系统参数不确定性时, 自动调整控制器的增益, 以保证系统的稳定性。

定理2: 针对具有集总干扰的非线性系统(式(3)), 给定非奇异快速终端滑模面(式(28)), 设计控制器(式(34)), 当满足假设条件(式(2))时, 使得系统状态能够快速收敛至滑模面, 则所设计的控制律能使系统渐进稳定, 即系统状态 $x(t)$ 将随着时间 t 的增加而趋于稳定, 且系统跟踪误差也将在有限时间内收敛为零。

证明: 选取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \beta \cdot \varphi_2 \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\varpi_i} (\hat{\mu}_i - \mu_i)^2 \quad (36)$$

对式(36)求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \beta \cdot \varphi_2 \left(\frac{1}{\varpi_1} (\hat{\mu}_1 - \mu_1) \dot{\hat{\mu}}_1 + \frac{1}{\varpi_2} (\hat{\mu}_2 - \mu_2) \dot{\hat{\mu}}_2 + \frac{1}{\varpi_3} (\hat{\mu}_3 - \mu_3) \dot{\hat{\mu}}_3 \right) = s\dot{s} + \\ &\beta \cdot \varphi_2 \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\varpi_i} (\hat{\mu}_i - \mu_i) \dot{\hat{\mu}}_i \end{aligned} \quad (37)$$

将式(30)代入式(37)得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \beta \cdot \varphi_2 \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\varpi_i} (\hat{\mu}_i - \mu_i) \dot{\hat{\mu}}_i = \\ &s(e_2 + \alpha \varphi_1 |e_1|^{\alpha-1} e_2 + \beta \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} \dot{e}_2) + \\ &\beta \cdot \varphi_2 \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\varpi_i} (\hat{\mu}_i - \mu_i) \dot{\hat{\mu}}_i \end{aligned} \quad (38)$$

将系统误差表达(式(27))、控制律(式(34))和自适应律(式(35))代入(式(38))得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} (\Lambda_2(e_1, e_2) s - \mathfrak{D} s^2 - (\hat{\mu}_1 + \hat{\mu}_2 |q| + \hat{\mu}_3 |\dot{q}|^2 + \gamma) |e|) + \beta \\ &\varphi_2 \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\varpi_i} (\hat{\mu}_i - \mu_i) \dot{\hat{\mu}}_i = \beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} \\ &(\Lambda_2(e_1, e_2) s - \mathfrak{D} s^2 - (\hat{\mu}_1 + \hat{\mu}_2 |q| + \hat{\mu}_3 |\dot{q}|^2 + \gamma) |e|) + \beta \cdot \varphi_2 ((\hat{\mu}_1 - \mu_1) |s| \\ &|e_2|^{\beta-1} + (\hat{\mu}_2 - \mu_2) |s| \cdot |e_2|^{\beta-1} |q| + (\hat{\mu}_3 - \mu_3) |s| \cdot |e_2|^{\beta-1} |\dot{q}|^2) \end{aligned} \quad (39)$$

等价于

$$\dot{V} = \beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} (\Lambda_2(e_1, e_2) s - \mathfrak{D} s^2 - \gamma |s|) - (\mu_1 + \mu_2 |q| + \mu_3 |\dot{q}|^2 |s|) \quad (40)$$

分析式(40), 可得

$$\dot{V} \leq \beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} (\Lambda_2(e_1, e_2) |s| - \mathfrak{D} s^2 - \gamma |s|) - (\mu_1 + \mu_2 |q| + \mu_3 |\dot{q}|^2 |s|) \quad (41)$$

即

$$\dot{V} \leq \beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} (-\varphi s^2 - \gamma |s|) \leq 0 \quad (42)$$

依据 Lyapunov 稳定性理论,可以证明系统是渐近稳定的。为了检验系统平衡点的稳定性,结合有限时间稳定性理论,系统的跟踪误差都会在有限时间内逐渐减小,最终趋于滑模平衡点。则有限时间 t_r 如下所示。

通过式 (41) 可以得到

$$\dot{V} \leq -\beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} \gamma |s| \quad (43)$$

通过分离变量法可得

$$\frac{dV}{-\beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} \gamma |s|} \leq -dt \quad (44)$$

假设从初始状态误差 $e(0) \neq 0$ 到 $e=0$ 的到达时间为 t_r , 则计算系统从初始状态 $V(0)$ 到 $V(t_r)$ 的收敛时间, 由式 (44) 得

$$\int_0^{t_r} dt \leq \int_{V(0)}^0 \frac{-dV}{\beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} \gamma \sqrt{2V}} \quad (45)$$

通过积分求解得

$$t_r \leq \frac{2}{\beta \cdot \varphi_2 |e_2|^{\beta-1} \gamma} \ln \left(\frac{\sqrt{V(0)}}{\sqrt{2}} \right) \quad (46)$$

通过使用 Lyapunov 稳定性分析,可以证明系统在有限时间内会收敛到滑模面 $s(t)=0$ 。系统在有限时间内收敛得以证明。

4 模拟仿真分析

为了更全面地验证机械臂在轨迹跟踪任务中的性能表现及控制效果,将所提出的控制策略应用于一个双连杆刚性机械臂的轨迹跟踪系统。首先,按照如图 2 所示的结构,构建了一个具备二自由度的机械臂平面模型,详细模拟了机械臂的运动过程,以确保能够有效分析控制策略在同轨迹跟踪情境下的表现。

图 2 中 m_1 和 m_2 分别为两连杆的质量; q_1 和 q_2 为两关节角度; l_1 和 l_2 为两连杆长度; J_1 和 J_2 是机械臂惯性量。机械臂动力学方程中相关矩阵定义如下:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$$

其中:

$$\begin{cases} M_{11} = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos(q_2) + J_1 \\ M_{12} = M_{21} = m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos(q_2) \\ M_{22} = m_2l_2^2 + J_2 \\ C_{11} = -m_2l_1l_2 \sin(q_2)\dot{q}_2 \\ C_{12} = -m_2l_1l_2 \sin(q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ C_{21} = m_2l_1l_2 \sin(q_2)\dot{q}_1 \\ C_{22} = 0 \\ G_{11} = (m_1l_1 + m_2l_1)g \cos(q_1) + m_2l_2g \cos(q_1 + q_2) \\ G_{21} = m_2gl_2 \cos(q_1 + q_2) \end{cases}$$

根据设计原理,选取控制器参数的初始范围,分析不同参数在时间滑模控制器中的影响,采用参数调节实验确定系统运行的最优参数值,以保证控制系统能够达到最佳性能。选择适当的机械臂模型参数、控制器

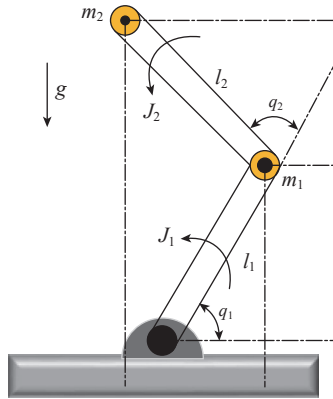


图2 二自由度机械臂模型
Fig.2 Two-degree-of-freedom robotic arm model

表1 系统参数表

Table 1 System parameters table

m_1/kg	m_2/kg	l_1/m	l_2/m	$J_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$J_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	γ
1.5	0.5	0.8	0.5	5	5	9.8	0.5
α	β	φ_1	φ_2	\mathfrak{g}	ω_1	ω_2	ω_3
2	0.6	1	1	diag{50, 50}	0.01	0.01	0.01

参数以及干扰观测器参数,如表 1 所示。

自适应律的初始条件为 $\hat{\mu}_1(0) = 0, \hat{\mu}_2(0) = 0, \hat{\mu}_3(0) = 0$ 。机械臂关节初始角位置取为 $q = [0.1 \ 0.1]^T$, 初始关节角速度为 $\dot{q} = [0.1 \ 0.1]^T$, 关节期望轨迹取为 $q_d = [q_{1d} \ q_{2d}]^T = [\cos(0.5\pi t) \ \sin t]^T$, 机械臂动力学建模的误差项设计为偏差裕度 20%, 即 $E_M = 0.2M, E_C = 0.2C, E_G = 0.2G$ 。摩擦模型 $\tilde{\lambda}(\dot{q}) = \delta \dot{q} (\delta_1 = \delta_2 = 0.20)$, 为考虑到两个关节动态性不同,取合适的 Π , 通过不等式 (25) 解得可逆矩阵 X 。

4.1 控制器比较

(1) 为验证本文所设计方法的有效性,突出干扰观测器可以对外部扰动进行补偿的性能,观测器通过反馈调节控制输入,使系统更加精确地跟踪期望轨迹,从而提高了跟踪精度。将未引入干扰观测器的控制器 (ANFTSMC) 与本文提出的控制器 (ANFTSMC-DO) 进行比较,分析其性能差异。

(2) 为体现出本文控制策略在控制精度和跟踪误差收敛速度方面的控制效果。突出改进型控制器在削弱系统固有抖振方面的作用。选择以下控制器进行比较。即基于非奇异快速终端滑模面构建了滑模控制器,记为 (NFTSMC), 滑模面和控制器分别为

$$\begin{cases} \sigma = e + H_1 \text{sig}^{n_1}(e) + H_2 \text{sign}^{n_2}(\dot{e}) \\ u = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - \hat{f} - H_2^{-1}n_2^{-1}(H_1n_1 \text{diag}\{|e|^{n_1-1}n_1\} + I_n) \text{sign}^{2I_n-n_2}(\dot{e}) - M(q)(v_1\sigma + v_2 \text{fal}^h(\sigma)) \end{cases} \quad (47)$$

为了公平比较不同控制算法的性能,通过反复进行仿真试验,结合数据统计分析,从而得出控制器的最优参数设置,式(47)中,参数设置分别为: $H_1=\text{diag}\{6,6\}$, $H_2=\text{diag}\{5,5\}$, $n_1=\text{diag}\{3,3\}$, $n_2=\text{diag}\{2,2\}$, $v_1=\text{diag}\{8,8\}$, $v_2=\text{diag}\{0.3,0.3\}$, $h=\text{diag}\{0.4,0.4\}$,其中 I_n 为单位矩阵。

将本文所采用控制器(ANFTSMC-DO)记为控制器A;未引入干扰观测器的滑模控制器(ANFTSMC)记为控制器B;另外选取的滑模控制器(NFTSMC)记为控制器C。接下来对系统的收敛时间、跟踪误差、控制输入、观测器性能等关键指标进行仿真分析。

图3和4为3种控制器在两关节角度跟踪方面的对比效果。通过对比分析,可以发现每种控制器都具备一定的跟踪能力。此外,通过结合

图5和6中两关节角速度跟踪误差,可以进一步深入分析控制器的整体性能。具体来看,虽然3种控制器均能够较好地实现预期的跟踪目标,并具备一定的鲁棒性和稳定性,但从响应速度和误差收敛速度的角度,本文设计的控制器能够迅速地响应输入信号,更快地减少跟踪误差,使得两关节角度和角速度在短时间内达到期望轨迹。两关节在控制器A的作用下,在0.15s后就能实现跟踪,控制器B需要0.5s后实现跟踪,而控制器C则需要1.8s后才能实现完全跟踪。可知控制器A的控制效果更稳定,产生的误差更小,具有良好的跟踪响应特性。

图7和8为3种控制器的控制输入力矩,根据仿真结果,可以观察到3种控制器的控制输入力矩特性各不相同。控制器C的控制输入力

矩存在显著的抖振现象,这表明在实际应用中可能会出现较大的波动,进而影响系统的稳定性和控制精度。相比之下,控制器B所产生的控制力矩相比控制器C明显减少了抖振,显示出更好的平稳性。然而,与上述两种控制器相比,本文所设计的控制器A在控制输入力矩曲线较为平滑,几乎不存在抖振现象。可知基于非线性干扰观测器的控制器A能够有效估计与补偿系统内的外部干扰及不确定因素,减少了滑模控制器对大幅度切换增益的需求,从而降低了高频抖振,更好地满足实际应用中的控制需求。

图9和10为3种控制器两关节角度跟踪误差图,结合图11和12中关节1、2在角速度误差收敛效果方面分析可以得出结论:控制器C在受外界干扰时,其跟踪误差相对较

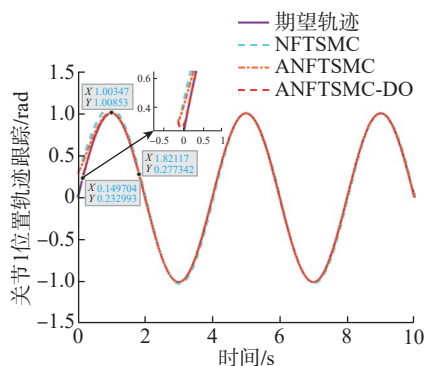


图3 关节1位置轨迹跟踪

Fig.3 Joint 1 position trajectory tracking

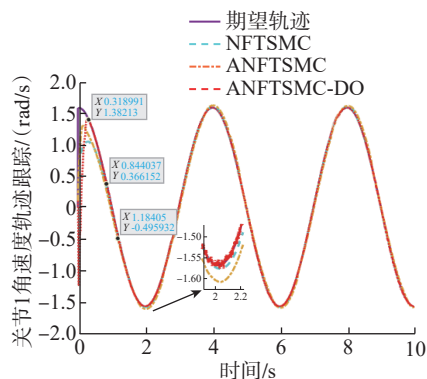


图5 关节1速度轨迹跟踪

Fig.5 Joint 1 velocity trajectory tracking

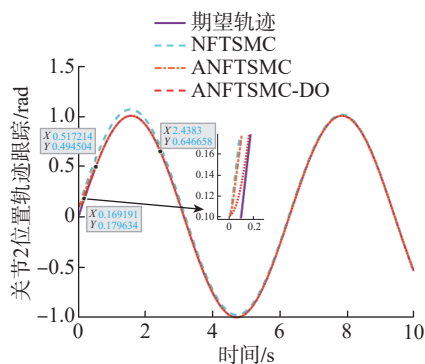


图4 关节2位置轨迹跟踪

Fig.4 Joint 2 position trajectory tracking

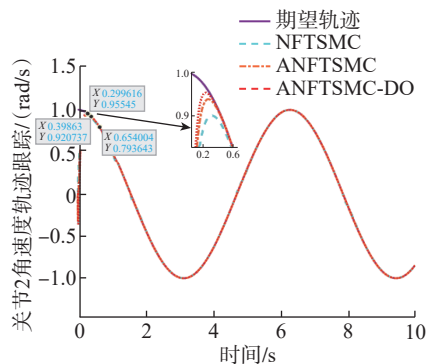


图6 关节2速度轨迹跟踪

Fig.6 Joint 2 velocity trajectory tracking

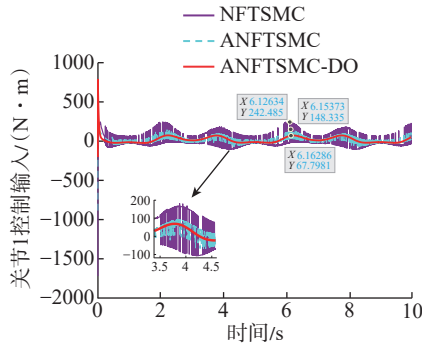


图7 关节1控制输入力矩

Fig.7 Joint 1 control input torque

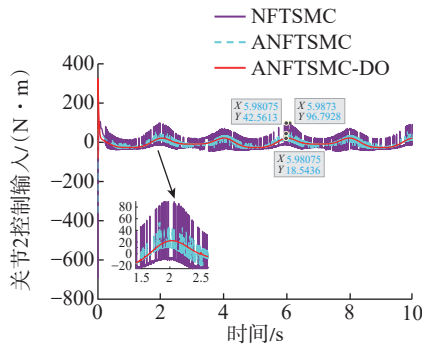


图8 关节2控制输入力矩

Fig.8 Joint 2 control input torque

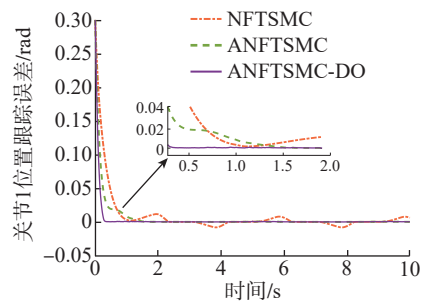


图9 关节1位置跟踪误差收敛曲线

Fig.9 Joint 1 position tracking error convergence curve

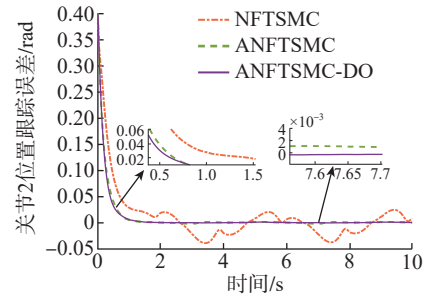


图10 关节2位置跟踪误差收敛曲线

Fig.10 Joint 2 position tracking error convergence curve

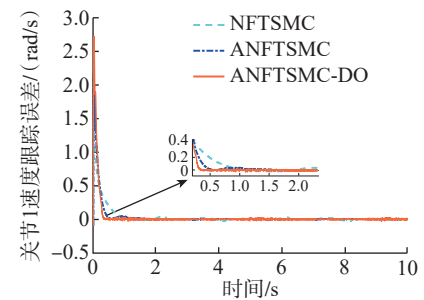


图11 关节1速度跟踪误差收敛曲线

Fig.11 Joint 1 velocity tracking error convergence curve

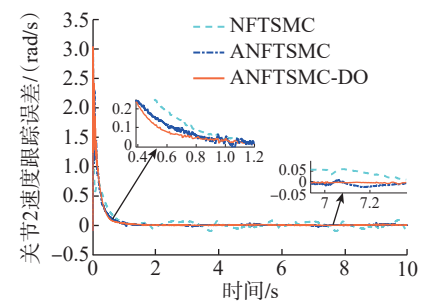


图12 关节2速度跟踪误差收敛曲线

Fig.12 Joint 2 velocity tracking error convergence curve

大,且收敛速度较慢,跟踪误差的波动明显。控制器B的跟踪误差在初始阶段较控制器C有所减小,表明其在抑制误差方面有所改进。但由于缺乏观测补偿,仍然难以完全消除干扰的影响,跟踪误差最终收敛精度有限。控制器A的误差收敛速度明显快于控制器B和控制器C,且误差值迅速趋于零,几乎没有波动。这表明观测补偿机制在角度跟踪误差的

抑制上具有显著效果。进一步验证了引入观测补偿的控制器在应对外界干扰时,观测补偿机制通过实时修正控制信号,使系统的跟踪误差逐渐减小并在有限时间收敛至零,表现出良好的补偿效果,提升了轨迹跟踪的精度和收敛速度。

从表2的“控制器平均角度跟踪误差数据对比”可以看出,在关节1和关节2的跟踪精度方面,不

同控制器表现出显著差异。控制器C的平均角度跟踪误差在关节1为 6.874×10^{-3} rad,关节2为 22.85×10^{-3} rad,误差最大,显示出较低的控制精度和抗干扰能力。控制器B尽管没有引入观测补偿,但相较于控制器C,关节1的误差减少至 3.192×10^{-3} rad,关节2减少至 5.734×10^{-3} rad,跟踪精度有明显提升。控制器A通过引入观测补偿机制,进一步提升了跟踪精

表 2 控制器平均角度跟踪误差数据对比
Table 2 Comparison of controller angle tracking error data 10^{-3} rad

关节	控制器 A	控制器 B	控制器 C
1	1.831	3.192	6.874
2	4.953	5.734	22.85

度,其在关节 1 和关节 2 的平均误差分别为 1.831×10^{-3} rad 和 4.953×10^{-3} rad,是 3 种控制器中表现最优的。总体而言,控制器 A 的设计在抗干扰和控制精度方面具备显著优势,能够更好地满足高精度控制需求。

4.2 观测器性能

为验证观测器在系统中的干扰估计精度,估计收敛速度等性能,图 13 和 14 分别为关节 1、2 的干扰的观测效果,图 15 和 16 分别为两关节的干扰观测误差图。可见,关节干扰观测误差不断减小,直至收敛为零。说明所采用的非线性干扰观测器具备高度精确的估计能力,能够有效捕

捉并准确估计系统内部所存在的各种扰动,系统能够在控制过程中实时调整输入控制量并对干扰进行及时补偿,在一定程度上能够增强系统的抗干扰能力。

5 结论

(1) 通过引入自适应控制律,结合滑模控制器,以应对参数变化和未建模的动态特性,基于 Lyapunov 函数的稳定性理论,有效证明了控制系统及干扰观测器的稳定性。

(2) 通过对比分析结果可见,所设计的控制策略能够有效减少控制过程中由建模误差和外界扰动引起

的轨迹偏差。相比传统方法,轨迹跟踪误差降低了约 35%,进一步增强了系统的整体性能。

(3) 同时也证明了所设计干扰观测器性能良好,控制系统能更精准地预测和补偿未知扰动,不仅实现了精确的误差收敛,还在降低抖振、提升抗干扰能力方面取得了显著效果。

参考文献

[1] YANG M M, YANG E F, ZANTE R C, et al. Collaborative mobile industrial manipulator: A review of system architecture and applications[C]// 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC). Lancaster, 2019.

[2] TAVAKOLI M, CARRIERE J, TORABI A. Robotics, smart wearable technologies, and autonomous intelligent systems for healthcare during the COVID-19 pandemic: An analysis of the state of the art and future vision[J]. Advanced Intelligent Systems, 2020, 2(7): 2000071.

[3] ZHANG N S, WANG S S, HOU Y L, et al. A robust predefined-time stable tracking control for uncertain robot manipulators[J]. IEEE Access, 2020, 8: 188600–188610.

[4] 宿俊浩, 于金鹏, 刘加朋, 等. 基于模糊观测器的柔性机械臂指令滤波反步控制[J]. 控制工程, 2025, 32(3): 500–507.

SU Junhao, YU Jinpeng, LIU Jiapeng, et al. Fuzzy observer-based command filtering backstepping control for flexible robotic arm [J]. Control Engineering, 2025, 32(3): 500–507.

[5] FARSHID E, ALI A N, ARIA A. Boundary control of a vertical nonlinear flexible manipulator considering disturbance observer and deflection constraint with torque and boundary force feedback signals[J]. International Journal of Systems Science, 20, 53(4): 704–725.

[6] 殷文喆, 练达芑, 李凯悦, 等. 基于分段自适应的机械臂力/位混合控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(1): 161–166.

YIN Wenzhe, LIAN Dapeng, LI Kaiyue, et al. Manipulator force/position hybrid control based on staged adaptation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(1): 161–166.

[7] AL-DUJAILI A Q, FALAH A, HUMAIDI A J, et al. Optimal super-twisting sliding mode control design of robot manipulator:

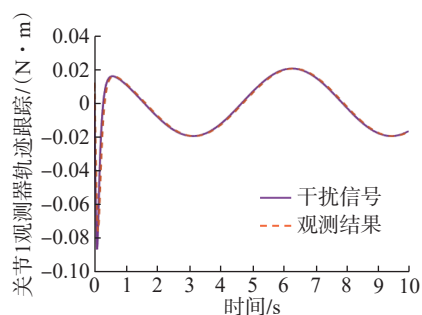


图 13 关节 1 干扰观测结果

Fig.13 Joint 1 disturbance observation results

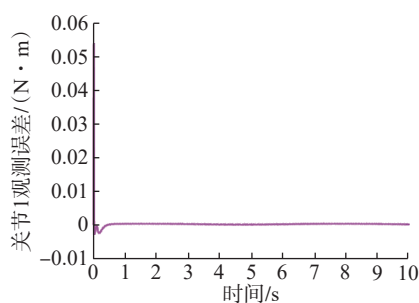


图 15 关节 1 干扰观测误差

Fig.15 Joint 1 disturbance observation error

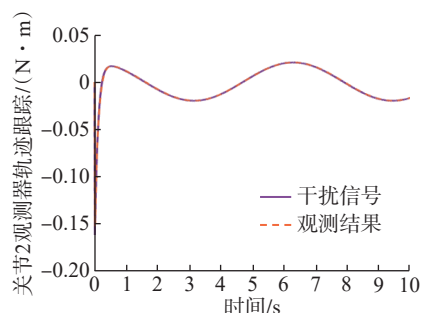


图 14 关节 2 干扰观测结果

Fig.14 Joint 2 disturbance observation results

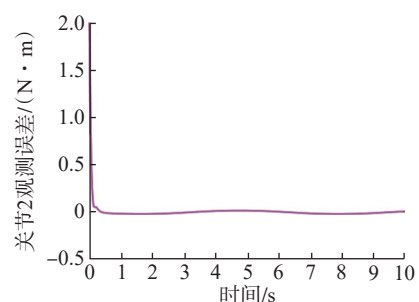


图 16 关节 2 干扰观测误差

Fig.16 Joint 2 disturbance observation error

Design and comparison study[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(6): 1729881420981524.

[8] TANG Y. Terminal sliding mode control for rigid robots[J]. Automatica, 1998, 34(1): 51–56.

[9] YAN W F, FEI J T. Adaptive control of MEMS gyroscope based on global terminal sliding mode controller[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013(1): 797626.

[10] 徐宝珍, 宋公飞, 王超, 等. 机械臂自适应非奇异快速终端滑模控制[J]. 光电与控制, 2021, 28(5): 46–50.

XU Baozhen, SONG Gongfei, WANG Chao, et al. Adaptive non-singular fast terminal sliding mode control of manipulator[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5): 46–50.

[11] 吴定会, 肖仁, 欧阳洪才, 等. 机械臂的改进固定时间滑模控制方法设计[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(8): 1171–1176.

WU Dinghui, XIAO Ren, OUYANG Hongcai, et al. Design of improved fixed time sliding mode control method for manipulator trajectory tracking[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(8): 1171–1176.

[12] SU Y X, ZHENG C H. A new

nonsingular integral terminal sliding mode control for robot manipulators[J]. International Journal of Systems Science, 2020, 51(8): 1418–1428.

[13] MA J J, ZHENG Z Q, LI P. Adaptive dynamic surface control of a class of nonlinear systems with unknown direction control gains and input saturation[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(4): 728–741.

[14] HAN G, MOFID O, MOBAYEN S, et al. Adaptive prescribed performance based on recursive nonsingular terminal sliding mode control for quad-rotor systems under uncertainty and disturbance: Real-time validation[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 147: 109028.

[15] YANG P, XUAN Y, LI W T. Adaptive nonsingular fast-reaching terminal sliding mode control based on observer for aerial robots[J]. Actuators, 2024, 13(3): 98.

[16] WANG C X, ZENG Y, TANG H F, et al. Adaptive finite-time sliding mode control of robot manipulators with possible actuator failures[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2803(1): 012027.

[17] TRAN D T, TRUONG H V A, AHN K K. Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control of robotic manipulator based neural network approach[J]. International Journal of

Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22(3): 417–429.

[18] ALATTAS K A, VU M T, MOFID O, et al. Adaptive nonsingular terminal sliding mode control for performance improvement of perturbed nonlinear systems[J]. Mathematics, 2022, 10(7): 1064.

[19] ZHOU Z C, TANG G Y, HUANG H, et al. Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control for underwater manipulator robotics with asymmetric saturation actuators[J]. Control Theory and Technology, 2020, 18(1): 81–91.

[20] LIU W Q, YE Z H, ZHANG D, et al. Adaptive estimator-based nonsingular fast terminal sliding mode control of robotic manipulator systems under FDI attacks and actuator failure[J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(15): 107129.

[21] NGUYEN V C, LE P N, KANG H J. An active fault-tolerant control for robotic manipulators using adaptive non-singular fast terminal sliding mode control and disturbance observer[J]. Actuators, 2021, 10(12): 332.

通信作者: 何长智, 硕士研究生, 研究方向为工业机器人柔顺控制。

Adaptive Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Control of Robotic Arm Under Unstructured Disturbances

WANG Jun, HE Changzhi

(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

[ABSTRACT] To address the impact of modeling errors and unknown external disturbances on the trajectory tracking accuracy of robotic arm systems in practical applications, an adaptive non-singular fast terminal sliding mode control strategy based on a nonlinear disturbance observer (ANFTSMC-DO) is designed. First, a nonlinear disturbance observer is devised to estimate disturbance information online. By selecting an appropriate nonlinear gain function, the estimation error converges rapidly in an exponential manner. Next, an adaptive non-singular fast terminal sliding mode controller is employed to handle parameter variations and unmodeled dynamics, preventing system performance degradation over time. Meanwhile, under the premise of ensuring robust stability and control accuracy, the proposed method effectively suppresses chattering, thereby enhancing resistance to external disturbances. Finally, simulations verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Robotic arm; Non-singular fast terminal sliding mode control; Nonlinear disturbance observer; Adaptive control; Finite-time convergence

(责编 大漠)