

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202001029



采用非线性干扰观测器的机械臂 补偿型滑模控制

曾伟鹏^{1,2}, 邵辉^{1,2}, 洪雪梅^{1,2}, 聂卓贇^{1,2}, 郭东生^{1,2}

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对机械臂系统中存在的内外复合不确定性干扰问题, 提出一种非线性干扰观测器补偿型滑模控制策略. 在非线性干扰观测器设计过程中, 引入辅助函数, 避免加速度反馈测量项; 同时实现对复合不确定性干扰的准确估计, 用以补偿系统的控制输入, 克服系统的“抖振”现象. 在滑模控制策略方面, 基于传统方法对惯性矩阵项进行调整的基础上, 引入跟踪误差对模型离心力和哥氏力项进行调整, 提高系统鲁棒性和稳定性. 结果表明: 两者结合能够最大限度地降低系统不确定性及外界干扰对机械臂控制性能的影响, 在抑制抖振的同时增强系统的鲁棒性, 提高轨迹跟踪精度.

关键词: 机械臂; 非线性干扰观测器; 补偿型滑模控制; 动力学系统

中图分类号: TP 273; TP 242

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2020)04-0415-08

Compensated Sliding Mode Control of Manipulator Arm Using Nonlinear Disturbance Observer

ZENG Weipeng^{1,2}, SHAO Hui^{1,2}, HONG Xuemei^{1,2},
NIE Zhuoyun^{1,2}, GUO Dongsheng^{1,2}

(1. Collage of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule,

Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Focusing on the internal and external complex uncertainties in the manipulator system, a compensated sliding mode control strategy based on nonlinear disturbance observer is proposed. For the design of the nonlinear disturbance observer, the auxiliary function is introduced to avoid the feedback of measured acceleration. The observer achieves an accurate estimation of the composite uncertainties interference, and at the same time compensates the control input of the system, which overcomes the “chattering” of the system. In the sliding mode control strategy, based on the traditional method to adjust the inertia matrix items, the tracking error is introduced to adjust the model centrifugal force and Coriolis force terms to improve the system robustness and stability. The results show: combination of both, it can minimize the influence of system uncertainty and external interference on the control performance of the mechanical arm, while suppressing chattering, enhance the robustness of the system and improve the trajectory tracking accuracy.

收稿日期: 2020-01-20

通信作者: 邵辉(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事机器人控制、运动规划的研究. E-mail: shaohuihu11@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61603143); 福建省自然科学基金资助项目(2019J01053); 福建省泉州市科技计划项目(2017T001)

Keywords: manipulator; nonlinear disturbance observer; compensated sliding mode control; dynamic system

近年来,随着社会经济高速发展,工业机械臂以其跟踪精度高、可靠性强的优势已被广泛应用于医疗、军事等重要领域.然而,机械臂系统是一个复杂的多变量系统,其不确定性、动态特性在系统模型中无法准确描述.此外,机械臂在作业过程中不可避免地受到各种不确定干扰,如关节摩擦和负载变化等外界不确定性,诸多因素易造成机械臂轨迹跟踪精度低的问题.为克服这些不利因素的影响,设计优越的控制策略对实现机械臂的高精度跟踪控制具有重要的理论与实际意义^[1-3].

滑模控制算法简单、响应速度快、对外界噪声干扰和参数摄动具有鲁棒性,其最大优点是滑动模态对加在系统上的干扰和系统的摄动具有完全的自适应性.因此,滑模控制在众多领域广受大学者青睐,亦在机器人控制领域得到广泛应用^[4].梅红等^[5]针对机械臂系统提出一种双幂次趋近率的变结构滑模控制策略,系统在达到滑模面上任意一点后能以更快的速度跟踪给定轨迹.李慧洁等^[6]提出了一种基于特定双幂次趋近率的滑模控制.Ruchika等^[7]针对系统存在的复合干扰采用一种新型的非奇异终端滑模控制策略.He等^[8]基于全程滑模的思想,引入一种带状态时滞项的积分型滑模面,克服了系统的不确定性以及时滞的影响,实现其高精度控制.尽管滑模控制具有较强的鲁棒性及快速响应能力,但是,滑模面切换具有不连续性,致使系统容易产生抖振;再者,对于高精度控制需求,一般需要增大控制增益,然而随着增益的增大,机械臂控制输入更易出现“抖振”现象^[9].

对于解决滑模控制的抖振问题,常用的主动抑制法有力反馈控制法和干扰观测法等^[10-11].郭闯强等^[12]在力矩负反馈PD控制的基础上,通过增加名义输出力矩前馈补偿,实现了兼顾高精度下的无抖振跟踪.于靖等^[13]针对一类多输入多输出不精确系统的轨迹跟踪精度问题,采用边界层自适应滑模控制方法,将其应用于空间飞行器高精度姿态控制,并基于传统方法设计干扰观测器以消除滑模控制中的抖振.Luo等^[14]设计一种高阶系统的干扰观测器结构,但给出的干扰观测器只能实现干扰估计误差渐近收敛到零.张贝贝等^[15]在此基础上,采用自适应变增益的方法,设计一种非奇异终端自适应幂指数趋近率的滑模微分干扰观测器,实现了系统快速响应的同时避免了抖振.

综上所述,本文针对机械臂系统中存在的内外复合不确定性干扰问题,提出一种非线性干扰观测器补偿型滑模控制(nonlinear disturbance observer compensating sliding mode control strategy, NDO-CSMC)策略,并将所提出控制策略应用于二自由度机械臂系统中.

1 机械臂动力学模型建立

对于 n 自由度的机械臂,采用拉格朗日方法建模,获得含建模不确定项的动力学微分方程,即

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau. \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} M(q) &= M_0(q) + \Delta M(q), \\ C(q, \dot{q}) &= C_0(q, \dot{q}) + \Delta C(q, \dot{q}), \\ G(q) &= G_0(q) + \Delta G(q). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1), (2)中: $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, $\dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]^T$, $\ddot{q} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n]^T$ 分别为关节角位移矩阵、角速度矩阵及角加速度矩阵; $M(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为离心力和哥氏力矢量; $G(q) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为重力矢量; τ 为关节驱动力矩; $M_0(q)$, $C_0(q, \dot{q})$, $G_0(q)$ 均为名义模型参数.在实际控制过程中,机械臂动力学模型难以准确获取,因此将 $M(q)$, $\Delta C(q, \dot{q})$, $\Delta G(q)$ 定义为名义模型与实际模型的参数误差.

考虑到机械臂作业过程中难免受到外界干扰,结合式(1),给出含内外复合不确定性干扰的动力学微分方程.即

$$M_0(q)\ddot{q} + C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) = \tau + \tau_d. \quad (3)$$

式(3)中: τ_d 为内外复合干扰不确定项,包含动力学模型不确定项 $\Delta M_0(q)\ddot{q}$, $\Delta C_0(q, \dot{q})\dot{q}$, $\Delta G_0(q)$ 及外界扰动 d .将式(3)化成状态空间方程的形式,即

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -M_0^{-1}(x_1)[C(x_1, x_2)x_2 + G_0(x_1) - \tau], \\ y &= x. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中: $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}, \mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2]^T, \mathbf{u} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d, \mathbf{y}$ 为系统输出.

模型具有如下3点性质.

性质1 惯性矩阵 $\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)$ 是对称、正定矩阵,且其范数有界,即

$$\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) = \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)^T > 0, \quad (5)$$

$$\forall \mathbf{x}_1 \in D\mathbf{x}_1, \quad \alpha(\mathbf{x}_1) < \|\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)\| < \beta(\mathbf{x}_1). \quad (6)$$

式(6)中: $D\mathbf{x}_1$ 为机械臂的工作范围, $\alpha(\mathbf{x}_1)$ 和 $\beta(\mathbf{x}_1)$ 分别为惯性矩阵范数的上、下限.

性质2 $\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q})$ 的二范数有界,即

$$\forall \mathbf{x}_1 \in D\mathbf{x}_1, \quad \|\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1)\| \leq \xi. \quad (7)$$

式(7)中: ξ 为正实数.

性质3 $\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) - 2\mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 是斜对称矩阵^[16], 即

$$[\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) - 2\mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)]^T = -[\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) - 2\mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)]. \quad (8)$$

假设1 内外复合干扰不确定项 $\boldsymbol{\tau}_d \in \mathbf{R}^n, \|\boldsymbol{\tau}_d\| < \hat{D}, \hat{D} \in \mathbf{R}_+$ 且未知; $\boldsymbol{\tau}_d$ 的一阶导数有界.

2 非线性干扰观测器设计

由于系统存在不确定性和外界干扰,为了减小干扰对系统的影响,提高系统控制精度的同时抑制抖振,引入非线性干扰观测器逼近系统干扰.对于传统非线性干扰观测器,一般假设机械臂在实际工程中角加速度信息可准确获取,参考文献[17]的非线性干扰观测器(NDO),即

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\tau}}}_d = -\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\hat{\boldsymbol{\tau}}_d + \mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\{\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)\dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1) - \boldsymbol{\tau}\}. \quad (9)$$

式(9)中: $\hat{\boldsymbol{\tau}}_d$ 为非线性干扰观测器的估计干扰; $\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 为非线性干扰观测器增益矩阵.

然而在实际工程中,利用传感器难以精确获取角加速度信息,而对速度信息求微分的加速度信息易引入高频噪声,造成系统的不稳定.因此,引入辅助变量设计如下非线性干扰观测器.

步骤1 构造辅助函数. 令

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_d = \mathbf{z} + f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2). \quad (10)$$

式(10)中: \mathbf{z} 为 NDO 内部状态向量; $f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 为待设计的非线性函数.

为避免引入加速度测量信息 $\dot{\mathbf{x}}_2$, 令

$$\dot{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)\dot{\mathbf{x}}_2. \quad (11)$$

步骤2 设计观测器结构. 结合式(3), (9)和(11), 对式(10)进行求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \dot{\hat{\boldsymbol{\tau}}}_d - \dot{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \\ &= \dot{\hat{\boldsymbol{\tau}}}_d - \mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)\dot{\mathbf{x}}_2 = -\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)[\mathbf{z} + f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)] + \\ &\quad \mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\{\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)\dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1) - \boldsymbol{\tau} - \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)\dot{\mathbf{x}}_2\} \\ &= -\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{z} + \mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\{\mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1) - \boldsymbol{\tau} - f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\}. \end{aligned} \quad (12)$$

因此,无加速度信息的非线性干扰观测器可设计为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= -\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{z} + \mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\{\mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_2 + \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1) - \boldsymbol{\tau} - f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\}, \\ \hat{\boldsymbol{\tau}}_d &= \mathbf{z} + f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

步骤3 设计增益矩阵. 定义非线性干扰观测器估计误差为

$$\Delta\boldsymbol{\tau}_d = \boldsymbol{\tau}_d - \hat{\boldsymbol{\tau}}_d. \quad (14)$$

为了准确估计内外复合不确定性干扰 $\boldsymbol{\tau}_d$, 需要设计干扰观测器更新定律. 因此, 对式(14)进行求导, 可获得干扰观测器误差动态方程为

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\tau}}_d = \dot{\boldsymbol{\tau}}_d - \dot{\hat{\boldsymbol{\tau}}}_d = \dot{\boldsymbol{\tau}}_d - \dot{\mathbf{z}} - \dot{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \dot{\boldsymbol{\tau}}_d - \mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)(\boldsymbol{\tau}_d - \hat{\boldsymbol{\tau}}_d). \quad (15)$$

当无干扰微分的先验知识, 取 $\dot{\boldsymbol{\tau}}_d = 0$. 故干扰观测器误差动态方程为

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\tau}}_d = -\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)(\boldsymbol{\tau}_d - \hat{\boldsymbol{\tau}}_d) = -\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)\Delta\boldsymbol{\tau}_d. \quad (16)$$

取

$$\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{M}_0^{-1}(\mathbf{x}_1), \quad (17)$$

将式(17)代入式(11),并对式(11)进行积分可得

$$f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{x}_2. \tag{18}$$

式(18)中: \mathbf{X}^{-1} 为待求解可逆矩阵.

上述基于非线性干扰观测器设计可归纳为如下定理.

定理 1 对于不确定的非线性机械臂系统(4),设计非线性干扰观测器为式(13),干扰观测器增益 $\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 为式(17),则干扰估计误差渐进收敛.

证明:设计 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d. \tag{19}$$

由于惯性矩阵 $\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)$ 为正定矩阵, \mathbf{X} 为可逆矩阵,故 $\mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X}$ 也是正定矩阵, V_1 正定. 对 V_1 进行求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \Delta \dot{\tau}_d^T \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d + \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \dot{\tau}_d + \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d \\ &= (-\mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \Delta \tau_d)^T \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d - \\ &\quad \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{Q}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \Delta \tau_d + \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d \\ &= (-\mathbf{X}^{-1} \mathbf{M}_0^{-1}(\mathbf{x}_1) \Delta \tau_d)^T \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d - \\ &\quad \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{X}^{-1} \mathbf{M}_0^{-1}(\mathbf{x}_1) \Delta \tau_d + \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d \\ &= -\Delta \tau_d^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)^{-T} \mathbf{X}^{-T} \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d + \\ &\quad \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d - \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \mathbf{X}^{-1} \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)^{-1} \Delta \tau_d \\ &= -\Delta \tau_d^T \mathbf{X} \Delta \tau_d + \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} \Delta \tau_d - \Delta \tau_d^T \mathbf{X}^T \Delta \tau_d \\ &= -\Delta \tau_d^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} + \mathbf{X}^T) \Delta \tau_d. \end{aligned} \tag{20}$$

为保证 $\dot{V}_1 < 0$, 须存在正定矩阵 $\boldsymbol{\varphi} > 0$, 使得不等 $\mathbf{X} - \mathbf{X}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \geq \boldsymbol{\varphi}$ 成立. 其中, \mathbf{X} 可采用线性矩阵不等式(LMI)求解.

3 非线性干扰观测器补偿型滑模控制的设计

基于非线性干扰观测器补偿型滑模控制(NDO-CSMC),如图1所示.其中, $\mathbf{q}_d = [q_{d1}, q_{d2}, \dots, q_{dn}]^T$, $\dot{\mathbf{q}}_d = [\dot{q}_{d1}, \dot{q}_{d2}, \dots, \dot{q}_{dn}]^T$, $\ddot{\mathbf{q}}_d = [\ddot{q}_{d1}, \ddot{q}_{d2}, \dots, \ddot{q}_{dn}]^T$ 分别为期望关节角度、角速度和角加速度信息.

定义 1 $\xi_1 = \mathbf{x}_{1d} - \mathbf{x}_1, \xi_2 = \mathbf{x}_{2d} - \mathbf{x}_2$.

定义 2 辅助变量 $\mathbf{x}_{2r} = \mathbf{x}_{2d} - \boldsymbol{\Lambda} \xi_1, \dot{\mathbf{x}}_{2r} = \dot{\mathbf{x}}_{2d} - \boldsymbol{\Lambda} \dot{\xi}_2$.

在定义 1, 2 中: $\mathbf{x}_d = [\mathbf{x}_{1d}^T, \mathbf{x}_{2d}^T]^T = [\mathbf{q}_d^T, \dot{\mathbf{q}}_d^T]^T$; ξ_1, ξ_2 分别为机械臂关节角位移、角速度跟踪误差; $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n), \lambda_i > 0$. 由此设计滑模面为

$$\mathbf{S} = \xi_2 + \boldsymbol{\Lambda} \xi_1. \tag{21}$$

传统滑模控制结构通常只对惯性矩阵项 $\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)$ 进行调整,其控制律^[18]为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \{ \dot{\mathbf{x}}_{2d} + \mathbf{K}_v \xi_1 + \mathbf{K}_p \xi_2 \} + \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{x}_2 + \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1). \tag{22}$$

式(22)中: $\mathbf{K}_v = \text{diag}(k_{v1}, \dots, k_{vi}, \dots, k_{vn}), k_{vi} > 0, \mathbf{K}_p = \text{diag}(k_{p1}, \dots, k_{pi}, \dots, k_{pn}), k_{pi} > 0$.

考虑机械臂系统模型不确定因素不仅与惯性矩阵 $\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1)$ 和重力矩阵 $\mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1)$ 有关,同时与模型哥氏力矢量 $\mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ 有关. 因此,在传统结构的基础上增加对哥氏力矢量的调整并结合文献[19],为滑模控制器添加趋近率 $(-\mathbf{K}_D \text{sgn}(\mathbf{S}))$,设计控制律为

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_a &= \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \dot{\mathbf{x}}_{2r} + \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{x}_{2r} + \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1), \\ \boldsymbol{\tau}_b &= -\mathbf{K}_D \text{sgn}(\mathbf{S}), \\ \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{\tau}_a + \boldsymbol{\tau}_b. \end{aligned} \right\} \tag{23}$$

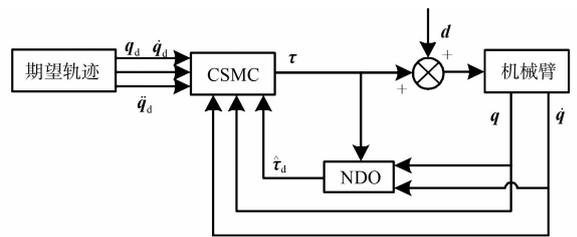


图 1 非线性干扰观测器补偿型滑模控制结构

Fig. 1 CSMC structure based-NDO

式(23)中: $\mathbf{K}_D = \text{diag}(k_{D_1}, \dots, k_{D_i}, \dots, k_{D_n}), k_{D_i} > 0$; $\text{sgn}(\mathbf{S}) = [\text{sgn}(S_1), \text{sgn}(S_2), \dots, \text{sgn}(S_n)]^T$, sgn 表示符号函数. 为进一步提高系统收敛速度, 采用饱和函数 sat 替代符号函数 sgn . 即有

$$\text{sat}(\mathbf{S}) = \begin{cases} \text{sgn}(\mathbf{S}), & |\mathbf{S}| \geq \rho, \\ \mathbf{S}/\rho, & |\mathbf{S}| < \rho. \end{cases} \quad (24)$$

式(24)中: $\rho > 0$ 表示滑模面边界层的宽度. 因此, 基于非线性干扰观测器的补偿型滑模控制律设计为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \dot{\mathbf{x}}_{2r} + \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{x}_{2r} + \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1) - \mathbf{K}_D \text{sat}(\mathbf{S}) - \hat{\boldsymbol{\tau}}_d. \quad (25)$$

上述基于非线性干扰观测器补偿型滑模控制器设计, 可归纳为如下定理.

定理 2 对于不确定非线性机械臂系统(4), 设计非线性干扰观测器(13); 然后, 基于此设计非线性干扰观测器的补偿型滑模控制律(25), 则闭环非线性系统的跟踪误差渐进收敛.

证明: 设计 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{S} + V_1. \quad (26)$$

对 V 进行求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{S}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \dot{\mathbf{S}} + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{S} + \dot{V}_1 \\ &= \mathbf{S}^T (\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \dot{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \dot{\mathbf{x}}_{2r}) + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{S} + \dot{V}_1 \\ &= \mathbf{S}^T (u - \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{x}_2 - \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1) - \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \dot{\mathbf{x}}_{2r}) + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{S} + \dot{V}_1 \\ &= \mathbf{S}^T (\mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \dot{\mathbf{x}}_{2r} + \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{x}_{2r} + \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1) - \mathbf{K}_D \text{sat}(\mathbf{S}) - \\ &\quad \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) (\mathbf{S} + \mathbf{x}_{2r}) - \mathbf{G}_0(\mathbf{x}_1) - \mathbf{M}_0(\mathbf{x}_1) \dot{\mathbf{x}}_{2r}) + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{S} + \dot{V}_1 \\ &= \mathbf{S}^T (-\mathbf{K}_D \text{sat}(\mathbf{S}) - \mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \mathbf{S}) + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) \mathbf{S} + \dot{V}_1 \\ &= -\mathbf{K}_D \mathbf{S}^T \text{sat}(\mathbf{S}) + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T (\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{x}_1) - 2\mathbf{C}_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)) \mathbf{S} + \dot{V}_1 \\ &= -\mathbf{K}_D \mathbf{S}^T \text{sat}(\mathbf{S}) + \dot{V}_1 \leq 0. \end{aligned} \quad (27)$$

当 $\dot{V} = 0$ 时, $\mathbf{S} = 0, \Delta \boldsymbol{\tau}_d = 0$. 据 LaSalle 不变性原理, 闭环系统为渐近稳定, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\mathbf{S} \rightarrow 0, \Delta \boldsymbol{\tau}_d \rightarrow 0$.

4 系统仿真实验

4.1 仿真系统

为了验证提出控制策略的有效性, 以二自由度机械臂为仿真研究对象, 其模型选取连杆质量 $m_1 = m_2 = 1.0 \text{ kg}$, 连杆长度 $l_1 = l_2 = 1.0 \text{ m}$. 同时, 引入如下 3 项模型内部干扰和 1 项外界时变干扰, 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) &= 0.2 \mathbf{M}_0(\mathbf{q}), & \Delta \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= 0.2 \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \\ \Delta \mathbf{G}(\mathbf{q}) &= 0.2 \mathbf{G}_0(\mathbf{q}), & \mathbf{d} &= [15 \sin(t) \quad 10 \sin(t)]^T. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

系统初始状态及期望跟踪轨迹为

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{q} &= [0 \quad 0]^T, & \dot{\mathbf{q}} &= [0 \quad 0]^T, \\ \mathbf{q}_d &= [\sin(2\pi t) \quad \sin(2\pi t)]^T, & \dot{\mathbf{q}}_d &= [2\pi \cos(2\pi t) \quad 2\pi \cos(2\pi t)]^T. \end{aligned} \right.$$

由线性矩阵不等式(LMI)求得 $\mathbf{X} = \text{diag}(0.05, 0.05)$; 采用控制器(25), 取补偿型滑模控制器中增益矩阵 $\mathbf{A} = \text{diag}(100, 100), \mathbf{K}_D = \text{diag}(300, 300)$, 滑模边界层宽度 $\rho = 0.8$.

4.2 传统滑模控制(SMC)与补偿型滑模控制(CSMC)对比

机械臂系统的传统滑模控制(SMC)与补偿型滑模控制(CSMC)对比实验, 如图 2, 3 所示. 图 2, 3 中: ζ 为位置跟踪误差; $\boldsymbol{\tau}$ 为力矩; t 为时间.

由图 2 可知: 考虑式(28)内外复合不确定性干扰情况下, 点线 SMC_s 为传统滑模控制策略的小增益控制, 其跟踪误差为 0.02 m ; 实线 SMC_L 为传统滑模控制策略的大增益控制, 其跟踪误差减小为 0.005 m , 即增益调大仍有较大跟踪误差. CSMC 策略跟踪误差可达到 0.001 m . 可见, 基于补偿型滑模控制策

略的效果明显优于基于传统滑模控制策略,其控制精度得到了极大的提高.

由图 3 可知:尽管 SMC 策略随着控制增益变大,系统控制精度有所提高,但是稳定性能降低,两个关节控制输入都出现了严重的“抖振”现象. 对于 CSMC 策略其关节 1 控制输入平滑,关节 2 控制输入依然存在“抖振”.

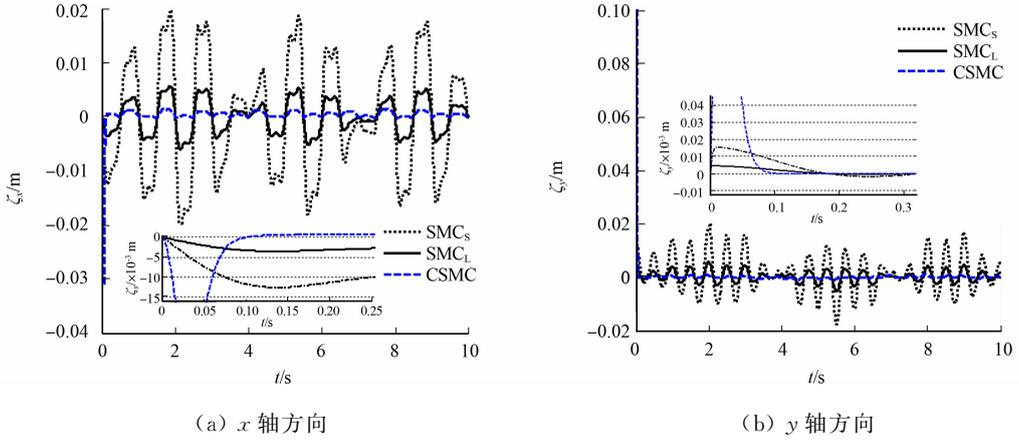


图 2 机械臂末端跟踪误差

Fig. 2 Tracking errors of manipulator tip

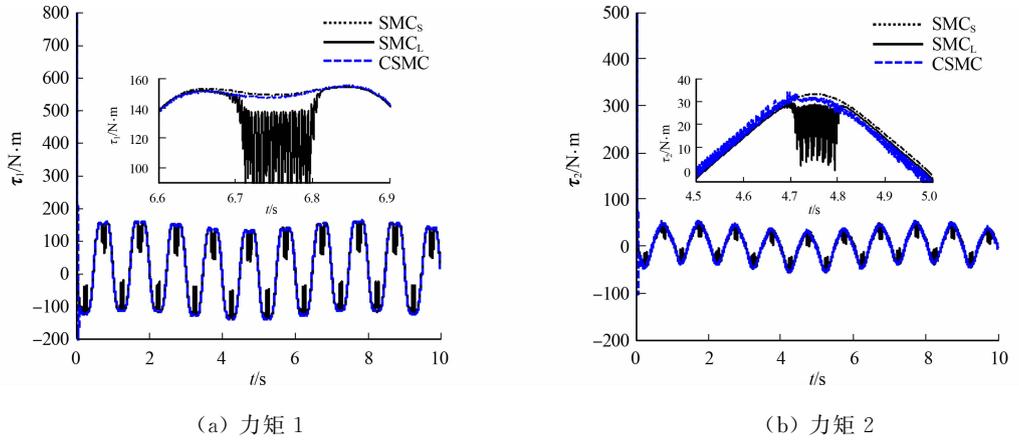


图 3 机械臂关节控制输入

Fig. 3 Control inputs of manipulator joint

4.3 CSMC 策略与 NDO-CSMC 策略对比

机械臂系统的 CSMC 策略与 NDO-CSMC 策略对比实验,如图 4~6 所示. 图 4~6 中: ζ 为位置跟踪误差; τ 为力矩; t 为时间.

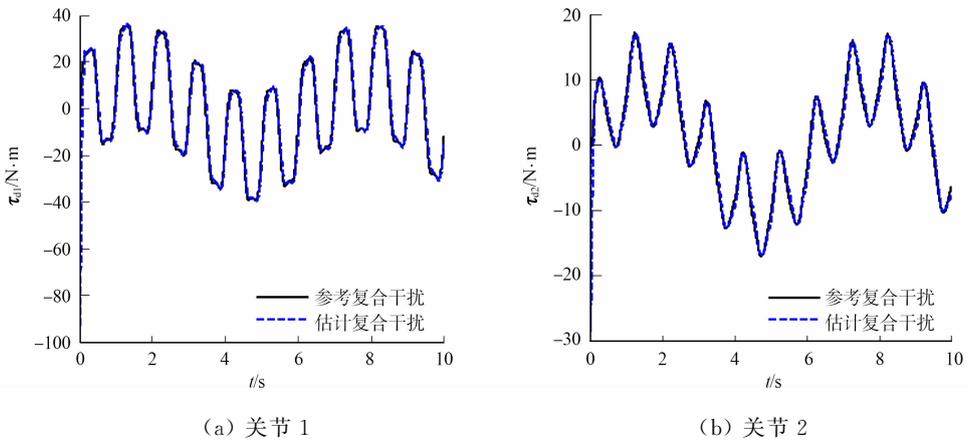


图 4 观测器复合干扰估计

Fig. 4 Compound disturbance estimation of NDO

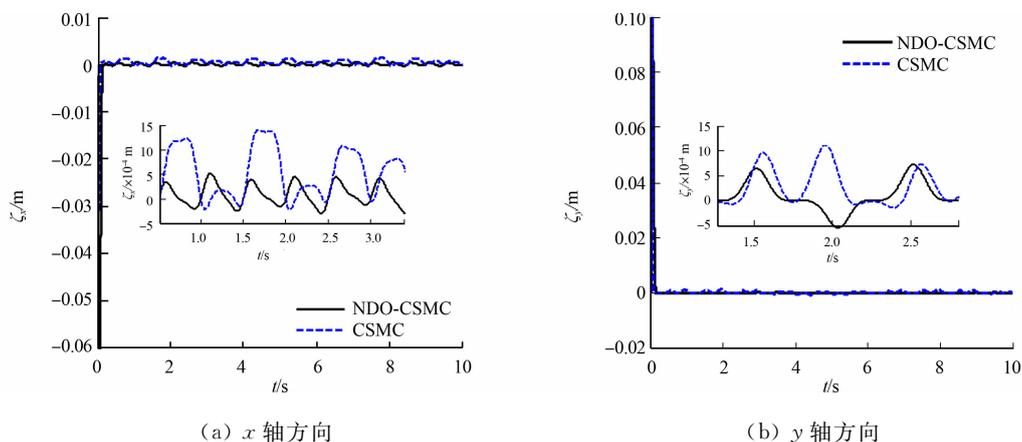


图 5 机械臂末端跟踪误差

Fig. 5 Tracking errors of manipulator tip

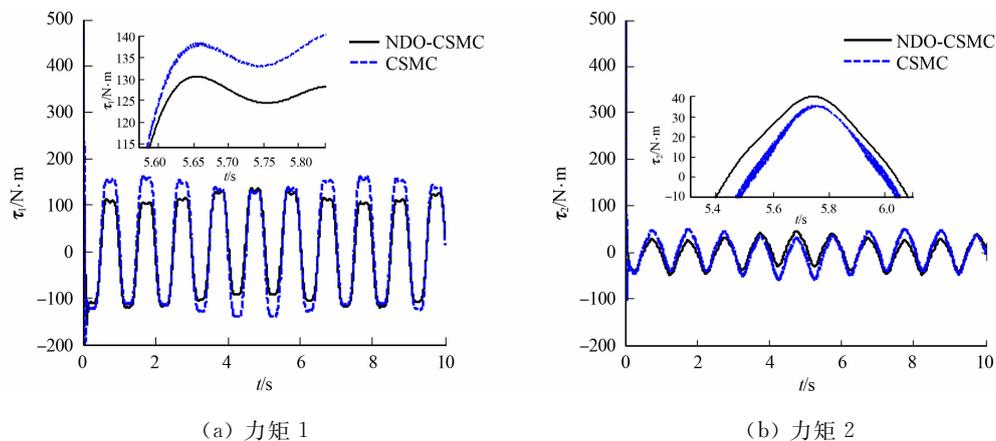


图 6 机械臂关节控制输入

Fig. 6 Control inputs of manipulator joint

从图 4 可知:在同样的复合干扰情况下,干扰观测器能够准确估计出系统存在的内外复合不确定性干扰(模型不确定性和外界干扰).从图 5 可知:相比 CSMC 策略,NDO-CSMC 策略轨迹跟踪精度进一步提高,其末端跟踪误差减小至 4.0×10^{-4} m.从图 6 可知:系统稳定性能更好,控制输入抖振现象趋近于零.由此可见,相比无干扰观测器补偿型滑模控制(CSMC)策略,基于非线性干扰观测器补偿型滑模控制(NDO-CSMC)策略表现出更好的抗干扰控制性能.

5 结论

文中针对机械臂系统在内外复合不确定干扰条件下的轨迹跟踪控制问题,提出一种基于非线性干扰观测器的补偿型滑模控制策略.设计的非线性干扰观测器避免了机械臂加速度的反馈测量项,实现了复合不确定干扰的准确估计,并对控制输入进行精准补偿.补偿型滑模控制策略考虑机械臂惯性矩阵项、哥氏力项及重力的调整作为系统控制输入,并设计趋近率、增加干扰补偿项.

在仿真实验中,引入 3 项模型不确定项作为系统内部干扰和外加时变信号作为外部干扰.仿真过程对比验证了所提出控制策略的抗干扰能力、系统响应速度及轨迹跟踪精度,并消除了抖振,改善了系统的动态性能.

参考文献:

[1] OH S, KONG K. Two-degree-of-freedom control of a two-link manipulator in the rotating coordinate system[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2015, 62(9): 5598-5607. DOI: 10.1109/TIE.2015.2408556.
 [2] CAI Caixia, SOMANI N, KNOLL A. Orthogonal image features for visual servoing of a 6-DOF manipulator with uncalibrated stereo cameras[J]. IEEE Trans Robot, 2016, 32(2): 452-461. DOI: 10.1109/TRO.2016.2535443.

- [3] YIP M C, CAMARILLO D B. Model-less feedback control of continuum manipulators in constrained environments [J]. IEEE Trans Robot, 2014, 30(4): 880-889. DOI: 10.1109/TRO.2014.2309194.
- [4] CHEN Mou, JIANG Bin. Robust attitude control of near space vehicles with time-varying disturbances [J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2013, 11(1): 182 - 187. DOI: 10.1007/s12555-012-0237-4.
- [5] 梅红, 王勇. 快速收敛的机器人滑模变结构控制 [J]. 信息与控制, 2009, 38(5): 552-557. DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2009.05.021.
- [6] 李慧洁, 蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法 [J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 498-503. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2014.1908.
- [7] RUCHIKA, KUMAR N, DINANATH. Non-singular terminal sliding mode control of robot manipulators with H_∞ trajectory tracking performance [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 24(11): 9057-9065. DOI: 10.1007/s13369-019-04049-5.
- [8] HE Wei, HUANG Bo, DONG Yiting, *et al.* Adaptive neural network control for robotic manipulators with unknown deadzone [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48(9): 2670-2682. DOI: 10.1109/TCYB.2017.2748418.
- [9] YU Lei, HUANG Jun, FEI Shumin. Sliding mode switching control of manipulators based on disturbance observer [J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2017, 36(6): 2574-2585. DOI: 10.1007/s00034-016-0421-5
- [10] CHEN Mou, CHEN Shaodong, WU Qingxian. Sliding mode disturbance observer-based adaptive control for uncertain MIMO nonlinear systems with dead-zone [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2017, 31(7): 1003-1018. DOI: 10.1002/acs.2744.
- [11] 唐文秀, 奚文龙, 李志鹏, 等. 基于滑模变结构和高增益状态观测器的直流电机位置控制 [J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(1): 82-88. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.01.011.
- [12] 郭闯强, 倪风雷, 孙敬颀, 等. 具有力矩传感器的柔性关节的振动抑制 [J]. 机器人, 2011, 33(4): 449-454. DOI: 10.3724/SP.J.1218.2011.00449.
- [13] 于靖, 陈谋, 姜长生. 基于干扰观测器的非线性不确定系统自适应滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(8): 993-999. DOI: 10.7641/CTA.2014.30920.
- [14] LUO Lijia, BAO Shiyi, MAO Jianfeng, *et al.* Nonlinear process monitoring based on kernel global-local preserving projections [J]. Journal of Process Control, 2016, 38(11): 11-21. DOI: 10.1016/j.jprocont.2015.12.005.
- [15] 张贝贝, 赵亚东, 赵通. 基于干扰观测器的机器人自适应滑模控制 [J]. 信息与控制, 2018, 47(2): 184-190. DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2018.0184.
- [16] SUN Wei, YUAN Wenxing, WU Yuqiang. Adaptive tracking control of mobile manipulators with affine constraints and under-actuated joints [J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 6(1): 728-738. DOI: 10.1007/s11633-015-0934-6.
- [17] HOMAYOUNZADE M, KHADEMHOSEINI A. Disturbance observer-based trajectory following control of robot manipulators [J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2019, 17(1): 203-211. DOI: 10.1007/s12555-017-0544-x.
- [18] ZHENG Wenchao, CHEN Mou. Tracking control of manipulator based on high-order disturbance observer [J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 26753-26764. DOI: 10.1109/access.2018.2834978.
- [19] 刘福才, 梁利环, 秦利, 等. 考虑重力影响的空间机械臂轨迹跟踪滑模控制 [J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1856-1861. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2013.0764.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)