

基于时延估计的不确定混联机构自适应惯性增益滑模控制方法

蒋毅贇, 高国琴, 方志明

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 针对一种需要考虑进出电泳槽液的汽车电泳涂装输送用混联机构运行时存在模型参数变化、外界扰动突变等不确定因素, 提出一种基于时延估计的自适应惯性增益滑模控制方法。首先利用时延估计 (TDE) 技术估计混联机构动力学模型; 针对混联机构存在的不确定性问题, 引入非奇异快速终端滑模控制方法设计混联机构基于时延估计的动力学控制算法, 并针对其惯性增益, 利用滑动变量及其导数设计一种新型自适应律, 以动态调节滑模控制器惯性增益, 从而削弱不确定因素对系统控制性能的不良影响, 提高系统鲁棒性与快速收敛性。采用 Lyapunov 理论证明该方法具有一致最终有界性, 通过 MATLAB 仿真和汽车电泳涂装输送用混联机构样机实验, 验证了该方法的有效性。

关键词: 混联机构; 时延估计; 滑模控制; 自适应控制; 机器人控制

DOI: 10.11907/rjdk.212696

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



中图分类号: TP306

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2022)010-0205-07

Sliding Mode Control Using an Adaptive Inertial Gain Dynamics for Hybrid Mechanism with Uncertain Dynamics Based on Time-Delay Estimation

JIANG Yi-zuan, GAO Guo-qin, FANG Zhi-ming

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: For a hybrid mechanism for automobile electro-coating conveying considering performance, sliding mode control using an adaptive inertial gain dynamics based on time-delay estimation (TDE) is presented to improve the control accuracy of this system with uncertain dynamics in model parameters variation and external vibration abruptly. First, the dynamic model of hybrid mechanism with time-delay estimation has been obtained online thanks to a time-delay estimation (TDE) technique; Next, to overcome problems caused by uncertain problems, anon-singular fast terminal sliding mode control is introduced for forming the dynamical control algorithm based on TDE. Meanwhile, propose a new inertial gain adaptation together with the sliding variable and its derivative to realizing dynamic gain adjustment. The resulting adaptive inertial gain dynamics is combined with the dynamical control algorithm, which enables reduce negative effects of the hybrid mechanism, improve robust and convergence speed of the system. Then a Lyapunov theory is selected for analysis to prove the UUB of this system. Through simulation with MATLAB and experiment using the prototype of hybrid mechanism for electro-coating conveyor, shows that the proposed method is effective.

Key Words: hybrid mechanism; time-delay estimation; sliding mode control; adaptive control; robot control

0 引言

混联机构是一种由串行链和并行链相结合所组成的

机械结构, 具有刚度大、承载能力强和工作空间大等优点^[1]。为提升现有汽车涂装输送设备的承载能力与柔性化水平, 本文基于混联机构研发了一种承载能力强、柔性化水平高的汽车电泳涂装输送系统^[2-3]。基于动力学模型

收稿日期: 2021-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51375210); 镇江市重点研发项目 (GZ2018004)

作者简介: 蒋毅贇 (1995-), 男, 江苏大学电气信息工程学院硕士研究生, 研究方向为混/并联机器人控制; 高国琴 (1965-), 女, 江苏大学电气信息工程学院教授、博士生导师, 研究方向为混/并联机器人控制、滑模控制; 方志明 (1978-), 男, 江苏大学电气信息工程学院副教授, 研究方向为切换系统、混杂系统。本文通讯作者: 高国琴。

的混联机构控制方法,考虑动力学特性,其非线性部分可以通过设计控制器进行补偿,在理论上能实现良好的控制效果^[4]。然而,混联机构的非线性、强耦合,复杂多输入多输出特性,导致建立其动力学模型较为复杂,同时其还因进出电泳槽液存在模型参数变化与外界扰动突变等不确定因素^[5]。为此,有必要从实时获取混联机构动力学模型、解决不确定性问题方面进行研究,以提高该混联机构的动力学控制性能。

为解决实时获取混联机构动力学模型问题,Hsia等^[6]最早提出时延估计技术以估计机械臂的模型,现已在机器人控制领域中获得广泛关注^[7-8]。其核心思想是利用时延估计(TDE)技术,通过采样系统在上一时刻的时延状态(输出与加速度)估计系统动力学模型,是一种无需复杂被控对象动力学模型,避免在线实时计算其逆动力学的方法^[9]。但传统TDE技术应用于动力学控制时常存在两个问题,一是存在时延估计误差影响跟踪精度,二是难以选取合适的时延估计常量惯性增益。

时延估计误差与采样频率有关且具有非线性,是限制控制器性能的固有因素^[10]。为解决时延估计误差对跟踪精度所造成的影响,在初期研究中提出了基于TDE的PD控制算法,以抑制时延估计误差在跟踪精度方面带来的影响,但针对采样频率较低的时变不确定系统抑制效果有限^[11-12]。相较于TDE-PD控制策略,基于TDE的等速趋近滑模控制算法,不仅可以抑制时延估计误差带来的影响,还能使系统在时变不确定性问题下达到更高的跟踪精度^[13-14]。Jin等^[15]提出基于TDE的非奇异快速终端滑模(NFTSM)控制方法,在提升时延估计误差下不确定系统跟踪精度的同时,利用NFTSM的系统状态在有限时间内收敛、改进终端滑模控制(TSMC)收敛速度缓慢甚至“收敛停滞”问题,并解决奇异性问题特点,实现更短时间的误差收敛,达到较高的跟踪精度^[16-17]。

在以上时延估计控制方法中,将控制律中的惯性增益矩阵 $\bar{\mathbf{M}}$ 设为常量矩阵。但采用常量惯性增益往往存在一些问题:选取过小的定常增益会导致较差的控制跟踪精度;过大的定常增益会引起系统振荡甚至不稳定^[18]。现有的TDE设计通常使用试错法选取 $\bar{\mathbf{M}}$ 的值^[10,19]。针对本文不确定混联机构,采用试错法难以选取合适的定常惯性增益,因为对于稳定情况下所进行选取的合适定常增益会在混联机构受模型参数变化、外界扰动突变等不确定因素影响时,导致控制效果退化,严重时甚至导致系统不稳定。

针对上述问题,本文利用TDE技术实时获取时延估计动力学模型,引入非奇异快速终端滑模抑制时延估计误差对跟踪精度的影响,以保证滑模面收敛速度与系统的非奇异性。针对该不确定混联机构难以选取合适定常惯性增益问题,对惯性增益矩阵 $\bar{\mathbf{M}}$ 提出自适应规则,不仅能动态调节得到合适惯性增益的值,且能使系统迅速抑制由外界扰动突变等引起的突变时延估计误差。最后,提出一种基

于时延估计的自适应惯性增益滑模控制方法,以提高混联机构在不确定性问题下的鲁棒性与轨迹跟踪精度。

1 混联机构描述及基于TDE的控制器

1.1 混联机构描述

本文选用课题组自主研发的汽车电泳涂装输送用混联机构,该双边对称混联机构的单侧结构如图1所示(其中,各数字指代如下:1-导轨、2-底座、3-行走驱动电机、4-减速机、5-移动滑块、6-升降驱动电机、7-连杆、8-从动轮、9-主动轮、10-连接杆、11-车体、12-翻转驱动电机、13-电动丝杆)。混联机构的行走驱动电机驱动行走轮带动整个机构做前进和后退的平移运动。由于升降、翻转机构是结构较复杂的双边对称混联机构,控制策略设计要求较高,因此着重研究升降翻转机构的动力学建模及控制策略。

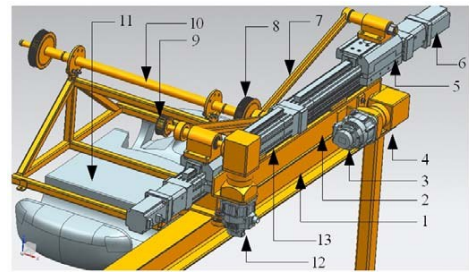


Fig.1 Hybrid mechanism for automobile electrocoat conveying

图1 汽车电泳涂装输送用混联机构

对于该混联机构,其动力学方程可表示为:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_d = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \varphi_1)^T$ 为单侧的滑块位移与主动轮逆时针转动角度; $\dot{\mathbf{q}}$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}$ 为对应的速度和加速度; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为广义惯性矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为Coriolis矩阵; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为重力项矢量; $\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为摩擦力项; $\boldsymbol{\tau}_d$ 为集总扰动项; $\boldsymbol{\tau}$ 为控制力矩向量。

1.2 基于TDE的控制器

引入一个常量对角阵作为惯性增益矩阵 $\bar{\mathbf{M}} = \text{diag}(\bar{M}_1, \bar{M}_2, \bar{M}_3)$,混联机构模型式(1)可以重新写成:

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

其中:

$$\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [\mathbf{M}(\mathbf{q}) - \bar{\mathbf{M}}]\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_d \quad (3)$$

式(3)中的 $\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 代表机构的整个非线性因素与不确定项,且可以很容易发现它对负载的变化是非鲁棒性的。假定式(1)满足 $\sigma_m \leq \|\mathbf{M}(\mathbf{q})\| \leq \sigma_M$ 这个条件, σ_m 、 σ_M 都是确定的正数。式(3)明显不容易计算,结合式(2)使用TDE技术对其进行估计。

将式(2)考虑时间变量重写为如下:

$$\ddot{\mathbf{q}}_{(t)} = \bar{\mathbf{M}}^{-1}(\boldsymbol{\tau}_{(t)} - \mathbf{N}_{(t)}) \quad (4)$$

将 \mathbf{N} 表示为时间 t 的函数,代表系统在运行时随时间发现的变化,其他作此下标的均代表此涵义。 \mathbf{N} 的估计值

可以通过 TDE 技术估计得到。

$$\mathbf{N} \approx \hat{\mathbf{N}} = \mathbf{N}_{(t-L)} = \boldsymbol{\tau}_{(t-L)} - \bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}}_{(t-L)} \quad (5)$$

其中, $\hat{\mathbf{N}}$ 是 \mathbf{N} 的估计值, $\mathbf{X}_{(t-L)}$ 代表 \mathbf{X} 的延时信号, L 为一个已知的采样周期, 采样周期的大小决定了 $\hat{\mathbf{N}}$ 对 \mathbf{N} 所估计的精确度, 当 L 越小其精度也会越好。在实际的数字控制器中, 控制器的最小时间步长通常是自身采样周期, 因此对 L 常见的设定是选取其系统采样的单步长度。需要注意的是, 式(5)中的 $\hat{\mathbf{N}}$ 是为了让控制器抵消掉机构中整个非线性因素与不确定项 \mathbf{N} , 而 $\hat{\mathbf{N}}$ 是由时延信号所计算出来的一个向量。因此, 应用于此控制器中的时延并非传统意义上起消极影响的时延。

采用 TDE 技术的传统时延估计控制器(TDC)已被提出, 其控制律为^[6]:

$$\boldsymbol{\tau}_{(t)} = \underbrace{\boldsymbol{\tau}_{(t-L)} - \bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}}_{(t-L)}}_{\text{TDE Scheme}} + \underbrace{\bar{\mathbf{M}}(\ddot{\mathbf{q}}_d + k_d\dot{\mathbf{e}} + k_p\mathbf{e})}_{\text{Linear Desired Dynamics}} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}_{(t)}$ 定义为轨迹跟踪误差, \mathbf{q}_d 为关节的期望运行轨迹。式(6)等号右边的第一部分能够补偿混联机构非线性动力学部分, 而第二部分则为线性期望误差动态方程, 作用于该闭环系统中。为提高系统鲁棒性和收敛速度, 式(6)的第二部分可采取其他公式, 详见第 2 章。

1.3 惯性增益 $\bar{\mathbf{M}}$

连列式(2)一式(6)并假设 $\mathbf{N} = \hat{\mathbf{N}}$ 时, 得到如下闭环方程:

$$\ddot{\mathbf{e}}_{(t)} + k_d\dot{\mathbf{e}}_{(t)} + k_p\mathbf{e}_{(t)} = 0 \quad (7)$$

由此可见, 经过运算后实现了整个关节动力学的解耦与线性化处理。但是通常由于时延值选取等一系列原因, 时延估计项无法完全补偿混联机构非线性动力学部分, 存在估计误差, 因而式(7)重新写为:

$$\ddot{\mathbf{e}}_{(t)} + k_d\dot{\mathbf{e}}_{(t)} + k_p\mathbf{e}_{(t)} = \bar{\mathbf{M}}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (8)$$

定义误差的表达式为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} \triangleq \mathbf{N}(\mathbf{q}\dot{\mathbf{q}}\ddot{\mathbf{q}}) - \mathbf{N}_{(t-L)} \quad (9)$$

在基于 TDE 的控制器中, $\bar{\mathbf{M}}$ 不仅对控制性能有重要影响, 还对系统稳定性起到至关重要的作用, 根据现有对 TDC 的稳定性判据^{[6,10][14-15]}:

$$\| \mathbf{I} - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}_{(t)})\bar{\mathbf{M}} \| < 1 \quad (10)$$

将式(9)称为 TDC 估计误差, 当满足式(10)的条件时 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是有界的。对于任意 $t \geq 0$ 的时间, 时延控制估计误差 (TDE errors) 在常数矩阵 $\bar{\mathbf{M}}$ 满足约束条件式(10)时都是有界的^[6,10]。理论上, $\bar{\mathbf{M}}$ 可以通过式(10)计算得到, 但实际上 $\bar{\mathbf{M}}$ 的值很难准确获得, 它会因如机器人位姿、外界不确定等因素而发生变化。进而在实际应用中通常采用试错法调节 $\bar{\mathbf{M}}$, 一个合适的惯性增益能够保证系统稳定性与控制性能, 相反也会对控制器造成严重影响。但增益的选择是一个复杂不容易的问题, 因为当机器人的惯量变化时, 即使当前选择了一个合适的值, 之后也可能无法满足约束条件式(10)。因此, 传统的 TDC 在应用中通常存在以下

两点问题: ① PD 型的线性误差动态方程处理复杂集总未知项时鲁棒性不足; ② 常量 $\bar{\mathbf{M}}$ 在系统处于时变、不确定性等问题的工作状态时难以保证系统稳定性与控制性能。

备注 1: 问题①在下文会作详细解释。

备注 2: 为确保式(5)的时延估计估计有效性, 采样周期 L 应该足够小。在常见的机器人中, 此要求可以很容易通过一个或几个采样周期的选取加以实现。但当系统的采样周期较长时, 则需要对 TDC 进行改进以达到控制要求^[19]。

2 基于时延估计的自适应惯性增益滑模控制器设计

为解决上述提到的两个问题, 首先通过引入非线性期望误差动态方程 (Nonlinear DED) 提高响应速度以及抑制时延估计误差项式(9), 达到加强控制性能要求。本文选择 NFTSM 动态方程替换控制律中的线性期望误差动态方程部分。根据研究的一般混联机构系统模型阶次, 故滑模面与趋近律设计选取如式(11)、式(12)^[20]:

$$\mathbf{s} = \mathbf{e}_{(t)} + \frac{1}{\alpha} |\mathbf{e}_{(t)}|^\gamma \operatorname{sgn}(\mathbf{e}_{(t)}) + \frac{1}{\beta} |\dot{\mathbf{e}}_{(t)}|^{\rho/q} \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{e}}_{(t)}) \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{s}} = -|\dot{\mathbf{e}}_{(t)}|^{\rho/q-1} [\rho_1 \mathbf{s} - \rho_2 |\mathbf{s}|^k \operatorname{sgn}(\mathbf{s})] \quad (12)$$

其中 $\rho_1, \rho_2, \alpha, \beta$ 为控制器参数, $q, p (p > q), \gamma > 1, 0 < k < 1$ 都是正奇数。选用 NFTSM 动态方程, 其具有有限时间收敛到平衡状态、消除抖振以及对系统不确定性和扰动具有很好的鲁棒性等特点。

本文提出基于 NFTSM 滑模面式(11)和趋近律式(12)的 TDC 策略, 如式(13):

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{\tau}_{(t-L)} - \bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}}_{(t-L)} + \bar{\mathbf{M}}(\Delta_1 + \Delta_2) \\ \Delta_1 &= \ddot{\mathbf{q}}_{d(t)} + \frac{\beta q}{p} |\dot{\mathbf{e}}_{(t)}|^{2-\rho/q} \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{e}}_{(t)}) (1 + \frac{\gamma}{\alpha} |\mathbf{e}|^{\gamma-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Delta_2 = \rho_1 \mathbf{s} + \rho_2 |\mathbf{s}|^k \operatorname{sgn}(\mathbf{s})$$

2.1 自适应惯性增益设计

上式中设置的增益矩阵 $\bar{\mathbf{M}}$ 往往是一个通过人为调试设定的定常对角矩阵。利用增益不变时的无模型控制性质, 首先将设计的控制律式(13)代入式(4)得:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{e}}_{(t)} + \frac{\beta q}{p} |\dot{\mathbf{e}}_{(t)}|^{2-\rho/q} \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{e}}_{(t)}) (1 + \frac{\gamma}{\alpha} |\mathbf{e}|^{\gamma-1}) + \rho_1 \mathbf{s} + \\ \rho_2 |\mathbf{s}|^k \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

再根据滑模面式(11)将式(14)变形为:

$$\dot{\mathbf{s}} + |\dot{\mathbf{e}}_{(t)}|^{\rho/q-1} (\rho_1 \mathbf{s} + \rho_2 |\mathbf{s}|^k \operatorname{sgn}(\mathbf{s})) = 0 \quad (15)$$

该非线性微分方程的收敛性可参考文献[20]。当考虑估计误差时, 式(15)重写为:

$$\dot{\mathbf{s}} + |\dot{\mathbf{e}}_{(t)}|^{\rho/q-1} (\rho_1 \mathbf{s} + \rho_2 |\mathbf{s}|^k \operatorname{sgn}(\mathbf{s})) = \bar{\mathbf{M}}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (16)$$

在闭环动态方程式(16)中, 时延估计误差 (TDE error) $\boldsymbol{\varepsilon}$ 可以看作是脉冲型扰动的输入误差。方程在给定估计误差 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 后, 滑模变量 \mathbf{s} 在稳态下的大小主要由 $\bar{\mathbf{M}}$ 决定, 同

时 ρ_1, ρ_2 与系统响应速度有关。因此,当 $\bar{\mathbf{M}}$ 的模值越大,滑模变量 \mathbf{s} 就越小。但由于不等式约束式(10)的存在, $\bar{\mathbf{M}}$ 的模值大小不能无限制增大,否则会使整个系统不可控。

由于混联机构工作中存在时变不确定性问题,这对于 $\bar{\mathbf{M}}$ 的选择提出了较高要求^[18]。引入自适应时延估计技术代替传统时延估计技术。设 $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) = \text{diag}(\hat{M}_{11}, \hat{M}_{22}, \hat{M}_{33})$ 为设计的自适应规则调整调节而得到的惯性增益矩阵, $\hat{M}_{ii}(i = 0, 1, 2)$ 如式(17):

$$\dot{\hat{M}}_{ii} = \hat{M}_{ii}^2 |s_i| \left[\exp\left(\frac{|\dot{s}_i| - \varphi_i}{k_i}\right) + \gamma_i \text{sgn}\left(|s_i| - \frac{\hat{M}_{ii}^2}{\delta_i}\right) \right] \quad (17)$$

其中 \cdot_i 和 \cdot_{ii} 分别代表向量 \cdot 的第 i 个元素与对角矩阵 \cdot 的第 ii 个斜对角元素;式中引入滑模变量 s_i 与其导数 \dot{s}_i ; γ_i, φ_i 与 k_i 是正常系数,起到调节惯性增益矩阵 $\bar{\mathbf{M}}$ 变化速率的作用; δ_i 是滑模变量 s_i 与 \hat{M}_{ii}^2 的正则化因子; \hat{M}_{ii}^2/δ_i 这项定义为约束层。通过引入式(11)中定义的 \mathbf{s} 变量,所提自适应律调节 $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})$ 到一个合适的范围内,用于保证系统在不确定性问题下的鲁棒性,同时提高了误差收敛速度。

自适应惯性增益 \hat{M}_{ii} 的自适应过程如下:当系统因模型参数变化等非时变不确定因素存在较大轨迹跟踪误差时, s_i 因式(11)会变大从而导致 $|s_i| < \hat{M}_{ii}^2/\delta_i$,进而符号函数 $\text{sgn}(s_i)$ 为正, \hat{M}_{ii} 将一直增加到足够抵消跟踪误差为止。相反,当跟踪误差足够小, s_i 也会足够小,进而导致 $|s_i| < \hat{M}_{ii}^2/\delta_i$,此时 $\text{sgn}(s_i)$ 为负, \hat{M}_{ii} 的值将会减小,从而避免得到过大的增益矩阵。同时,在变化缓慢时 $|\dot{s}_i| - \varphi_i \ll 0$,指数项的值可以小到忽略对 \hat{M}_{ii} 变化的影响。当系统工作中受时变不确定影响时,时延估计误差会随其变化频率的上升而变大,相应的 $|\dot{s}_i|$ 也将变大,导致 $|\dot{s}_i| - \varphi_i \gg 0$ 。此时, $\exp\left[\frac{|\dot{s}_i| - \varphi_i}{k_i}\right]$ 项在式(17)中起作用, \hat{M}_{ii} 指数增大进而减小了轨迹跟踪误差,保证系统在 ε 剧增时的系统稳定与误差快速收敛。突变发生后一段时间恢复到 $|\dot{s}_i| - \varphi_i \ll 0$,自适应律变化又回到了第一种情况分析。

因此,通过引入自适应规则,动态调节惯性增益 \hat{M}_{ii} ,变量 $|s_i|$ 收敛到 \hat{M}_{ii}^2/δ_i 此邻域内,约束层约束了滑模变量 \mathbf{s} 范围从而限制跟踪误差 \mathbf{e} 的大小,进而使系统在具有较好

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= \sum_{i=1}^n \left[s_i \left(-|\dot{e}_i|^{p/q-1} (\rho_1 s_i + \rho_2 |s_i|^k \text{sgn}(s_i)) + \hat{M}_{ii}^{-1} \varepsilon_i \right) - \hat{M}_{ii}^{-1} |s_i| \left(\exp\left(\frac{|\dot{s}_i| - \varphi_i}{k_i}\right) + \gamma_i \text{sgn}\left(|s_i| - \frac{\hat{M}_{ii}^2}{\delta_i}\right) \right) \right] \\ &\leq \sum_{i=1}^n \left[-|\dot{e}_i|^{p/q-1} (\rho_1 s_i^2 + \rho_2 |s_i|^{k+1}) + |s_i| \hat{M}_{ii}^{-1} (|\varepsilon_i| - \exp\left(\frac{|\dot{s}_i| - \varphi_i}{k_i}\right) - \gamma_i) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

当 $\forall |s_i| > \hat{M}_{ii}^2/\delta_i$ 时,式(21)中的不等式成立。在正常工作条件下,估计误差 ε_i 的上界为 ε_i^+ ,公式项 $\exp\left[\frac{|\dot{s}_i| - \varphi_i}{k_i}\right] \approx 0$ 。当 $\varepsilon_i^+ < \gamma_{ii}$ 时, $\dot{\mathbf{V}}$ 是负定的,此时闭环系统满足Lyapunov稳定条件。同时受时变不确定性问

跟踪性能的同时保证系统的鲁棒性。最终根据对 $\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})$ 提出的自适应律重写式(13)得到自适应惯性增益滑模控制方法的控制率如式(18):

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \underbrace{\boldsymbol{\tau}_{(t-L)} - \hat{\mathbf{M}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \ddot{\mathbf{q}}_{(t-L)}}_{\text{TDE Scheme}} + \underbrace{\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}})}_{\text{Adaptive Gain}} [\rho_1 \mathbf{s} + \rho_2 |\mathbf{s}|^k \text{sgn}(\mathbf{s})] \\ &+ \underbrace{\hat{\mathbf{M}}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) \left[\ddot{\mathbf{q}}_{d(t)} + \frac{\beta q}{p} |\dot{\mathbf{e}}_{(t)}|^{2-p/q} \text{sgn}(\dot{\mathbf{e}}_{(t)}) \left(1 + \frac{\gamma}{\alpha} |\mathbf{e}|^{\gamma-1}\right) \right]}_{\text{Nonlinear DEE}} \end{aligned} \quad (18)$$

所设计基于时延估计的自适应惯性增益滑模控制器原理框图如图2所示。

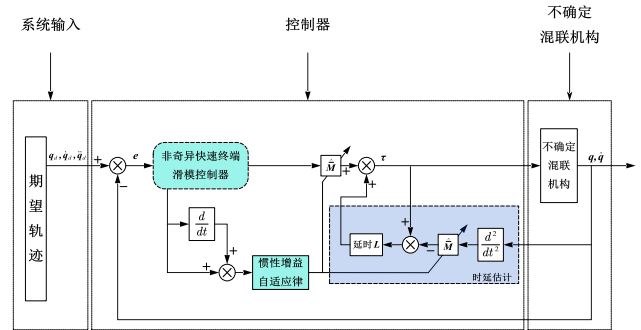


Fig. 2 Schematic diagram of controller

图2 控制器原理框图

2.2 稳定性证明

根据Lyapunov理论证明根据式(18)所提出的基于时延估计的自适应惯性增益滑模控制系统的一致最终有界性。

假设1:系统不确定部分及外部随机干扰项变化缓慢时延误差 ε_i 有上界,为 ε_i^+ 。当选用合适的控制增益 \hat{M}_{ii} 时,假设1成立,具体证明过程可参考文献[21]。

假设2:在时间 $t=0$ 时,滑模变量 s_i 靠近于零。这是因为通常在实际操作中,混联机构的初始运行位置一般也为期望轨迹的初始位置。

设计一个Lyapunov方程如下:

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\bar{\mathbf{M}}} \right)^2 \quad (19)$$

其中 $\hat{M}_{ii} > 0$,接着可以得到 \mathbf{V} 的时间导数:

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} - \sum_{i=1}^n (\hat{M}_{ii}^{-3}) \dot{\hat{M}}_{ii} \quad (20)$$

将式(15)和自适应律式(16)代入式(18)中可得:

题影响,估计误差 ε_i 在突变的一段时间内上界变为 $\varepsilon_i^{++}(\varepsilon_i^{++} > \varepsilon_i^+)$,并且 $|\dot{\mathbf{s}}| \gg 0$ 。当 $\varepsilon_i^{++} < \gamma_{ii} + \exp\left[\frac{|\dot{s}_i| - \varphi_i}{k_i}\right]$ 时, $\dot{\mathbf{V}}$ 同样是负定的,闭环系统仍然是满足Lyapunov稳定条件。

当 $V|s_i| \leq \hat{M}_{ii}^2/\delta_i$ 时, 此闭环系统的解接近于一个滑动流形, 系统不能确定能够达到 $|s_i| = 0$, 而是处于接受层 \hat{M}_{ii}^2/δ_i 中。因此, 该闭环系统是一致最终有界的, 在 $V|s_i| \leq \hat{M}_{ii}^2/\delta_i$ 中 \dot{V} 不予讨论。

3 仿真及结果比较

3.1 仿真环境

以式(1)所示的汽车电泳涂装输送用混联机构作为被控对象, 给出两个实例进行仿真研究, 最终通过比较各方法数值模拟的结果验证了所建立模型与提出方法的有效性。情况一为在模型参数变化的不确定因素下进行仿真, 特意“随机”设置被控对象的变化负载质量 $m=15\text{kg}$; 情况二为在基于情况一且受外界扰动突变的时变不确定因素下进行仿真, 其中混联机构的主要参数参考文献[2]。

仿真时定义式(1)中的集总扰动项为 $\tau_d = \Delta M(q)\ddot{q} + H(t) + \tau_{ext} + U$, 其中 $H(t) = F_c \text{sgn}(\dot{q}) + B_c \dot{q}$, F_c, B_c 分别是库伦摩擦力与粘滞摩擦力; $U = [u(t), u(t), u(t)]^T$ 为外界扰动突变, $u(t) = t_1 u(t-4) + t_2 u(t-5) + t_3 u(t-12) + t_4 u(t-13)$ ($u(t)$ 为阶跃函数), 简单模拟白车身进槽与出槽时的受扰状态; $\tau_{ext} = [\tau_{ext1}, \tau_{ext2}, \tau_{ext3}]$ 是外部随机扰动; $\Delta M(q)$ 是建模误差。集总扰动项中的各项参数如表 1 所示。仿真时间为 16s, 仿真与实验时的时延估计采样周期 L 均为 1ms。

Table 1 Lumped disturbance term parameters
表 1 集总扰动项参数

参数	数值
$\Delta M(q)$	$\text{diag}(1, 1.1, 1)$
F_c	$\text{diag}(1.1, 1.1, 1.1)$
B_c	$\text{diag}(1.5, 1.5, 1.5)$
$[t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4]$	$[15, -5, 5, -15]$
$\tau_{ext}(i = 1, 2, 3)$	$\tau_{ext} = 0.5\sin(2\pi t + \pi/2)/(N \cdot m)$

3.2 数值仿真

为验证所提出控制方法的有效性, 将在变负载具液阻汽车电泳涂装输送用混联机构中对基于时延估计的自适

应惯性增益滑模控制方法(简称为: 所提方法)的仿真结果与另外两种方法的仿真结果进行比较。这两种分别是基于拉格朗日动力学模型的 NFTSM 控制方法(简称控制方法 1)与基于时延估计的定常惯性增益滑模控制方法(简称控制方法 2)。

非奇异快速终端滑模面参数为: $\alpha = 7, \beta = 2, \gamma = 3, \rho = 5, q = 3$; 控制律参数为: $\rho_1 = 5, \rho_2 = 12, k = 0.5$; 惯性增益 \hat{M} 自适应律参数为: $\delta = [3, 3, 30]^T$, $\varphi = [10, 10, 0]^T$, $k = [20, 20, 0.35]^T$, $\gamma = \text{diag}(0.15, 0.15, 1.5) \times 10^2$, 初值 $\hat{M}_0 = [2, 2, 2]^T$ 。控制方法 1 中控制器使用已有名义模型^[2], 其负载质量 $m=5\text{kg}$ 。

由于升降翻转机构两边对称, 两边对应关节运动一致, 故只给出一侧升降翻转机构各主动关节的仿真曲线。图 3 为在第一种情况下各主动关节轨迹跟踪误差曲线; 图 4 和图 5 分别为在第二种情况下的各主动关节轨迹跟踪曲线与所提方法根据系统状态对于惯性增益矩阵 \hat{M} 进行调节的曲线。3 种控制器下各主动关节的轨迹跟踪均方根误差数据(RMSE)如表 2 所示。

如图 3 所示, 控制方法 1 由于无法在线辨识系统参数变化的不确定情况, 拉格朗日动力学模型的不精确导致轨迹跟踪误差较大; 而使用了 TDE 技术的控制方法 2 与所提方法通过估计系统动力学模型解决了模型参数变化带来的不确定性问题, 都有较小的轨迹跟踪误差。同时, 通过对惯性增益矩阵的自适应调整, 所提方法在同等情况下相对于控制方法 1、2 具有较快的收敛速度, 如表 2 所示, 所提方法具有更高的轨迹跟踪精度。如图 4 所示, 所提方法在 4 个时刻受到外界扰动突变项影响产生较大轨迹跟踪误差时, 所产生的误差峰值较小, 误差收敛速度较快, 该控制方法对变负载具液阻混联机构具有良好的跟踪性能。如图 5 所示, 惯性增益自适应律根据轨迹跟踪误差的大小对惯性增益矩阵 \hat{M} 进行实时调整, 当较大初始误差及外界扰动突变项干扰时, 各惯性增益 \hat{M}_{ii} 的值变大, 使得误差减小; 当系统逐渐趋于一个相对稳定的状态时, \hat{M}_{ii} 的值又将减小到一个较小邻域内。这与上文进行理论分析的惯性增益矩阵变化情况相吻合。

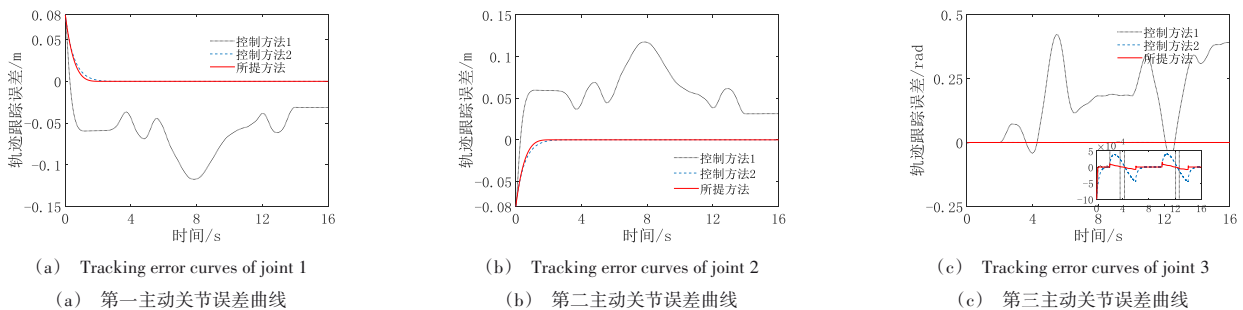


Fig. 3 Tracking error curve of joint trajectory under case 1

图 3 情况一下关节轨迹跟踪误差曲线

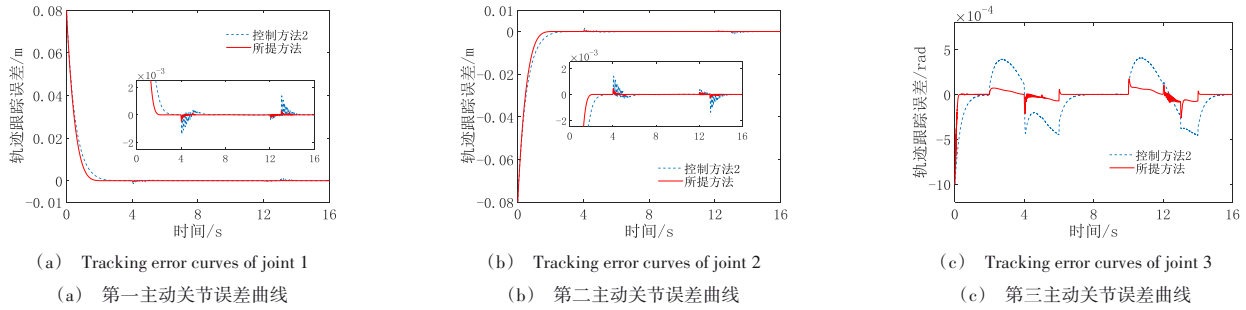


Fig. 4 Tracking error curve of joint trajectory under case 2

图4 情况二下关节轨迹跟踪误差曲线

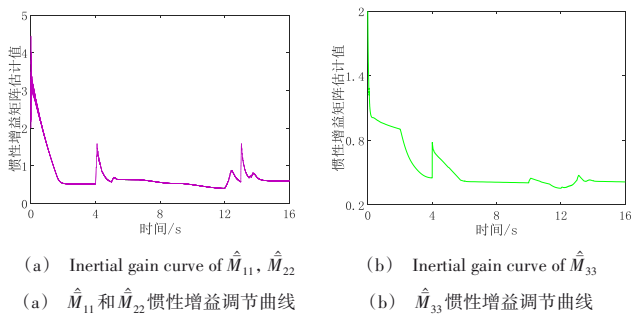


Fig. 5 The inertial gain matrix \hat{M}

图5 惯性增益矩阵 \hat{M}

Table 2 Tracking RMSE of each joint trajectory under case 1
表2 情况一各关节轨迹跟踪 RMSE

3种方法比较	主动关节1(m)	主动关节2(m)	主动关节3(rad)
所提方法	9.8452×10^{-3}	9.8502×10^{-3}	7.1075×10^{-5}
控制方法2	1.0203×10^{-2}	1.0243×10^{-2}	2.3693×10^{-4}
控制方法1	6.4781×10^{-2}	6.4851×10^{-2}	2.1738×10^{-1}

4 实验及结果分析

汽车电泳涂装输送用混联机构样机系统实验平台以及样机进入槽液时的状态如图6所示。

为进一步验证所提出的基于时延估计的自适应惯性增益滑模控制方法的有效性,将所提出方法与基于时延估计定常惯性增益滑模控制方法(控制方法2)应用

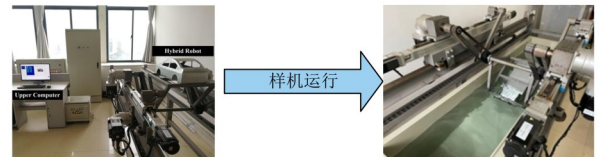


Fig. 6 A novel hybrid mechanism for automobile electro-coating conveying system

图6 汽车电泳涂装输送用混联机构样机系统

于输送混联机构样机,并通过车体进出水槽的过程表示系统受到的时变不确定因素,分别进行运动控制实验。样机升降关节与翻转关节轨迹跟踪误差的实验曲线如图7所示,样机升降关节与翻转关节最大跟踪误差与受扰最长收敛时间的实验结果如表3所示。

Table 3 Experimental results of maximum joint tracking error and maximum disturbed convergence time

表3 关节最大跟踪误差与受扰最长收敛时间实验结果

	所提方法	控制方法2
最大跟踪误差		
主动关节1/ $\times 10^{-3}$ m	0.8287	2.056
主动关节2/ $\times 10^{-3}$ m	1.046	3.086
主动关节3/ $\times 10^{-3}$ m	3.636	10.21
最长收敛时间		
主动关节1/s	0.756(4~8s)	2.135(4~8s)
主动关节2/s	0.878(4~8s)	2.260(4~8s)
主动关节3/s	1.506(10~14s)	1.602(10~14s)

由图7和表3可知,所提方法具有较小的跟踪误差实验结果,且误差峰值较小,在受扰产生突变误差后其最长收敛时间也较短。这进一步验证了所提出的基于时延估计的自适应惯性增益滑模控制方法的有效性,该方法能够

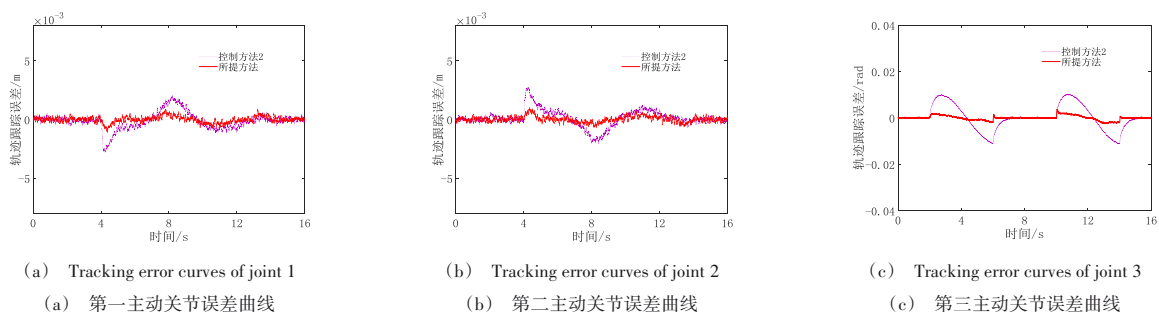


Fig. 7 Experimental results of joint trajectory tracking error

图7 关节轨迹跟踪误差实验结果

同时保证较好的轨迹跟踪性能和较高的误差收敛速度。结果表明, 该控制方法可以保证输送混联机构样机在受不确定因素干扰时的较高轨迹跟踪精度。

5 结语

文本针对汽车电泳涂装输送用混联机构建立其动力学模型较为复杂且难以获取精确模型参数的问题, 提出一种基于时延估计的滑模控制算法, 并通过设计惯性增益矩阵自适应律克服了不确定因素对系统的影响, 最后通过仿真实验验证了所提出的基于时延估计的自适应惯性增益滑模控制算法的有效性。仿真与实验结果表明, 该算法在混联机构输送车体进出电泳槽液时, 可在保持轨迹跟踪精度的同时保证系统的稳定性并提高响应速度。本文在研究过程中主要考虑了输送车体进出电泳槽液时对系统的影响, 仅将其当做简单的突变扰动干扰, 然而在实际场景下, 进出电泳槽液的过程需更为详细的分析, 同时在空气与电泳液中运行时也需要考虑不同阻力、摩擦力等。因此, 在后续研究中可对混联机构进出电泳槽液的工作情况作进一步分析, 改进相应控制算法以提高算法实用性和可行性。

参考文献:

- [1] LIU N, WU J. Kinematics and application of a hybrid industrial robot-delta-RST[J]. *Sensors & Transducers*, 2014, 169(4): 186-192.
- [2] GAO G Q, CHEN T P, FANG Z M. Dynamic modeling of new automobile electrophoretic coating conveying mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(21): 8-16.
高国琴, 陈太平, 方志明. 新型汽车电泳涂装输送机构的动力学建模 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(21): 8-16.
- [3] ZHU M X, GAO G Q, WU J, et al. Performance analysis of motion/force transfer efficiency of parallel/hybrid vehicle electrophoretic coating conveying mechanism [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28 (18) : 2152-2160.
朱明星, 高国琴, 吴军, 等. 一种并/混联汽车电泳涂装输送机构运动/力传递效率性能分析 [J]. *中国机械工程*, 2017, 28(18): 2152-2160.
- [4] QIN Q, GAO G. Screw dynamic modeling and novel composite error-based second-order sliding mode dynamic control for a bilaterally symmetrical hybrid robot[J]. *Robotica*, 2021, 39(7):1-17.
- [5] GAO G, YE M, ZHANG M. Synchronous robust sliding mode control of a parallel robot for automobile electro-coating conveying[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 85838-85847.
- [6] HSIA T C, GAO L S. Robot manipulator control using decentralized linear time-invariant time-delayed joint controllers[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990: 2070-2075.
- [7] VAN M, GE S S, REN H. Finite time fault tolerant control for robot manipulators using time delay estimation and continuous nonsingular fast terminal sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 47(7): 1681-1693.
- [8] ZHANG J Y, GAO T Y, YU X Y, et al. Continuous non-singular terminal sliding mode control for space manipulator based on adaptive time delay estimation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57 (11) : 177-183.
张天宇, 高天宇, 于潇雁, 等. 基于自适应时延估计的空间机械臂连续非奇异终端滑模控制[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(11): 177-183.
- [9] WANG Y, LIU L, YUAN M, et al. A new model-free robust adaptive control of cable-driven robots[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, 19(9):3209-3222.
- [10] BAEK J, CHO S, HAN S. Practical time-delay control with adaptive gains for trajectory tracking of robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 65(7): 5682-5692.
- [11] YOUCEF-TOUMI K, ITO O. A time delay controller for systems with unknown dynamics [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1990, 112(1): 133-142.
- [12] 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.
- [13] ADHIKARY N, MAHANTA C. Sliding mode control of position commanded robot manipulators[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 81: 183-198.
- [14] LEE J, CHANG P H, JIN M. An adaptive gain dynamics for time delay control improves accuracy and robustness to significant payload changes for robots [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67 (4): 3076-3085.
- [15] JIN M, LEE J, CHANG P H, et al. Practical nonsingular terminal sliding-mode control of robot manipulators for high-accuracy tracking control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(9): 3593-3601.
- [16] MORADKHANI S, HAGH Y S, WU H, et al. Dynamic analysis and control of a fusion reactor vacuum vessel assembly robot[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 154: 111532.
- [17] YE M, GAO G, ZHONG J, et al. Finite-time dynamic tracking control of parallel robots with uncertainties and input saturation [J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 2996.
- [18] AHN D S. Time-delay control for the implementation of the optimal walking trajectory of humanoid robot[J]. *Journal of Drive and Control*, 2018, 15(3): 1-7.
- [19] WANG Y, LIU L, WANG D, et al. Time-delay control using a novel nonlinear adaptive law for accurate trajectory tracking of cable-driven robots [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16 (8) : 5234-5243.
- [20] HUA Y L, SUN W, CHI B S, et al. Study on nonsingular fast terminal sliding mode control[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39 (5): 1119-1125.
华玉龙, 孙伟, 迟宝山, 等. 非奇异快速终端滑模控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(5): 1119-1125.

(责任编辑: 孙娟)