

控制与决策

Control and Decision

考虑关节柔性的绳驱动空中机械臂关节空间鲁棒控制

姚勇, 丁力, 马瑞, 王尧尧

引用本文:

姚勇, 丁力, 马瑞, 王尧尧. 考虑关节柔性的绳驱动空中机械臂关节空间鲁棒控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 971–979.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1893>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于扩张状态观测器的二质量系统非奇异快速终端滑模控制](#)

Nonsingular fast terminal sliding mode control based on extended state observer for two mass systems

控制与决策. 2023, 38(3): 850–856 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1076>

[基于扩张状态观测器的四旋翼无人机快速非奇异终端滑模轨迹跟踪控制](#)

Fast nonsingular terminal sliding mode trajectory tracking control of a quadrotor UAV based on extended state observers

控制与决策. 2022, 37(9): 2201–2210 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1819>

[考虑扰动与输入饱和的机械臂连续非奇异快速终端滑模控制](#)

Continuous non-singular fast terminal sliding mode control of robotic manipulators considering disturbance and input saturation

控制与决策. 2022, 37(4): 903–912 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1335>

[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](#)

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

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

[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>

考虑关节柔性的绳驱动空中机械臂关节空间鲁棒控制

姚勇¹, 丁力^{1†}, 马瑞¹, 王尧尧²

(1. 江苏理工学院 机械工程学院, 江苏 常州 213001; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘要: 空中机械臂在外部环境交互作业方面表现出很强的研究和应用价值, 但当前系统位姿控制性能较弱、负载能力不足以及续航时间短的问题严重制约其作业能力的提升. 鉴于此, 设计一种带有绳驱动机械臂的新型空中机械臂系统, 并将引入绳驱动机制带来的柔性效应等价到关节处, 建立考虑关节柔性的刚柔耦合动力学模型. 首先, 针对系统在集总干扰下的关节空间轨迹跟踪控制, 采用线性扩张状态观测器对集总干扰进行估计和补偿, 并采用超螺旋算子和分数阶非奇异终端滑模以保证系统在到达阶段和滑模阶段均有较好的控制性能; 然后, 在 Lyapunov 稳定性框架下验证所设计控制器的稳定性; 最后, 通过可视化仿真和地面实验对所设计控制器的有效性进行验证. 实验结果表明, 所设计的鲁棒控制器比其他两种现有的控制器具有更快的响应速度、更强的抗干扰能力以及更高的跟踪精度, 能够满足绳驱动空中机械臂的控制需求.

关键词: 空中机械臂; 绳驱动; 分数阶; 非奇异终端滑模; 线性扩张状态观测器; 超螺旋算子

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1893

引用格式: 姚勇, 丁力, 马瑞, 等. 考虑关节柔性的绳驱动空中机械臂关节空间鲁棒控制 [J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 971-979.

Robust control for a cable-driven aerial manipulator with joint flexibility in joint space

YAO Yong¹, DING Li^{1†}, MA Rui¹, WANG Yao-yao²

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aerial manipulator shows intense research value and application value in terms of interacting with the external environment. However, the improvement of operation ability of the rotary-wing flight robot is restricted at present, which is caused by the weak pose control performance, insufficient load capacity, and short endurance time. This paper designs a novel cable-driven aerial manipulator system. Considering the flexibility of cable-driven mechanism, a rigid-flexible coupling dynamics model has been established considering the joint flexibility. To address the trajectory tracking control issue in joint space under lumped disturbances, a linear extended state observer is adopted to estimate and compensate the lumped disturbances. Meanwhile, a super-twisting algorithm and fractional-order non-singular terminal sliding mode are used to ensure good control performance in both the reaching phase and the sliding mode phase. Furthermore, the stability of the proposed controller is proven with the Lyapunov theory. Finally, the effectiveness of the proposed controller is verified through visual simulation and ground test. All the results show that the proposed controller has faster response speed, stronger disturbance rejection ability, and higher tracking accuracy compared to other common controllers, which can satisfy the control requirements of the cable-driven aerial manipulator.

Keywords: aerial manipulator; cable-driven; fractional order; non-singular sliding mode; linear extended state observer; super-twisting algorithm

0 引言

作为一种特殊的机器人系统, 无人机具有结构简单、操控方便、机动灵活等特点, 广泛应用于空中作业任务, 如航拍测绘、电力巡检、战场侦察等场景^[1-2]. 当

前, 大部分无人机只能执行被动式的监测任务, 无法与其所处环境产生主动交互作业. 为此, 科研人员将多自由度机械臂加装到无人机上, 形成了一种新型的空中机械臂系统. 受益于机械臂的加入, 使得空中机

收稿日期: 2021-11-02; 录用日期: 2022-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005231, 52175097); 常州市社会发展科技支撑项目(CE20215050).

责任编辑: 谢晖.

[†]通讯作者. E-mail: nuaadli@163.com.

械臂能够实现远程科学采样、高空危险物清除、地面目标捕捉等任务^[3-5]。然而,现有的空中机械臂大多采用的是传统刚性机械臂,其较大的转动惯量会加剧机械臂与无人机间的耦合效应,使得系统的位姿难以保持稳定。为解决这一问题,Xu等^[6]将绳驱动技术应用于机械臂上,使得驱动电机可放置于基座处,从而降低了机械臂的惯量和能耗。但由于驱动绳索是柔性的,这也会带来空中机械臂整体刚度的下降,进而导致系统对于外部干扰和自身的振动极为敏感。因此,设计一种高性能的鲁棒控制器对实现绳驱动空中机械臂系统高精度抗干扰作业至关重要。

针对上述问题,国内外学者们已开展了广泛的研究,并形成了不少可行的控制策略,如自适应控制^[7]、滑模控制(sliding mode control, SMC)^[8]、神经网络控制^[9]、反演控制^[10]以及结合不同算法的混合控制^[11]等。其中,SMC因其具有结构简单、响应速度快、对系统不确定性不敏感等特点被广泛应用于机器人的控制系统。在SMC中,滑模面的选择是影响滑模控制性能优劣的重要因素。近年来,分数阶滑模面因其具有快速收敛性和强鲁棒性而得到了学者们的青睐。如黄道敏等^[12]提出了一种分数阶积分滑模控制方法,避免了奇异问题并实现了水下机械臂的抗干扰轨迹跟踪控制。Wang等^[13]提出了一种分数阶非奇异终端滑模控制(fractional-order non-singular terminal sliding mode, FONTSM)方法用于解决刚性液压机械臂的轨迹跟踪问题,并通过实验验证了该方法在强不确定性和非线性条件下具有较好的收敛速度和跟踪精度。Kali等^[14]针对具有不确定性和外部扰动的多自由度机械臂关节空间轨迹跟踪问题,提出了一种可抑制抖振并实现快速收敛的超螺旋算子(super-twisting algorithm, STA),并通过仿真和实验验证了该方法的有效性。进一步地,绳驱动空中机械臂面临由复杂动力学耦合效应、未建模延时、阵风干扰以及绳索柔性变形等组成的集总干扰,这会增加高性能控制器设计的难度。据报道,扰动观测器能够较好地实现对系统集总干扰的实时估计和补偿,从而消除干扰对系统的影响^[15]。在扰动观测器中,线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)结构简单,不仅能够实时观测和获取估计量,也可对系统输出的各阶导数进行观测,更易于工程实现。如Shi等^[16]提出了一种基于SMC和LESO的鲁棒控制器,用于解决六自由度模块机械臂的轨迹跟踪问题,通过仿真验证了该策略的有效性。徐海洋等^[17]针对时变环境干扰和模型不确定下无人水下航行器的悬停控制问题,提出了

一种LESO与反演控制结合的控制方法,并通过仿真验证了该方法的有效性。

受上述分析的启发,本文将FONTSM、STA与LESO三者相结合,提出一种不基于模型的鲁棒控制策略,旨在解决计及关节柔性的绳驱动空中机械臂关节空间的鲁棒控制问题。根据作业任务需求,设计了绳驱动空中机械臂的虚拟样机,利用Lagrange-Euler法推导了系统的刚柔耦合动力学模型。利用FONTSM和STA保证系统的快速收敛和高精度跟踪,通过LESO对集总干扰进行估计和补偿进而获得较强的鲁棒性,然后通过Lyapunov方法分析了系统的稳定性,最后通过仿真和实验验证了所设计控制器的有效性和优越性。

1 系统描述

1.1 结构设计

本文的设计目的是设计一款能够在排污管道口完成水质采样任务的绳驱动空中机械臂系统,该系统应满足续航时间长、负载能力大、位姿控制性能好的要求。图1为课题组设计的绳驱动空中机械臂的虚拟样机,主要包括四旋翼飞行器和二自由度绳驱动机械臂,两者通过吊舱相连接,驱动电机、电源、水泵等装置则放置于吊舱中。系统的工作原理为:采样人员操纵绳驱动空中机械臂飞行至排污管道口附近悬停,然后控制机械臂使得末端执行器伸入管道内,并通过水泵实现汲水采样。这里需要补充的是,若采用传统的刚性机械臂,机械臂与飞行器间的质量比会增大,从而放大了两者间的耦合效应,这会对飞行器的悬停造成较大的干扰,严重时甚至会导致飞行器倾翻^[18]。



图1 绳驱动空中机械臂虚拟样机

为了降低机械臂的质量,本文引入了绳驱动技术,将驱动电机安装在吊舱内(基座处),如图2所示。同时,为了进一步减轻机械臂臂身质量,除关节轴和一些需要螺纹加工的重要零件由铝合金制成外,其他零件均采用轻质尼龙材料并通过3D打印技术进行加工。最终设计好的绳驱动机械臂完全伸展长度为

515 mm,运动部件质量为221 g,而整个系统的总质量为2 651 g,运动部件质量与系统总质量间的质量比仅为0.083,故它们之间的耦合效应对系统控制的影响得到了显著削弱.上述轻量化设计大大降低了机械臂质量和关节惯量,提高了其带负载能力,增加了系统作业续航时间,同时较小的自重比也使得系统更加稳定.另外需要说明的是,本文仅研究绳驱动机械臂的动力学特性和控制器设计,而飞行器动力学和控制的研究并不在此次研究的范畴内.

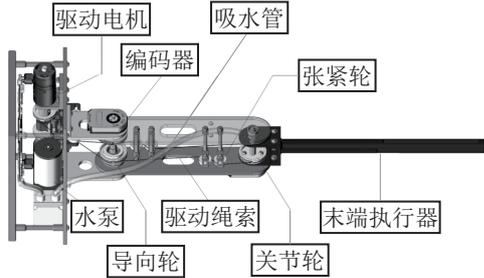


图2 绳驱动机械臂三维模型

1.2 动力学模型

绳驱动机械臂运动时,驱动电机通过柔绳将扭力传递给关节轴,绳索的柔性主要集中于关节处,故可将其当作柔性关节,并将柔性关节简化为一个线性弹簧进行建模分析^[19],如图3所示.利用Lagrange-Euler法可推得所设计的绳驱动机械臂刚柔耦合动力学模型为

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + G + \tau_d = K_s(\theta - q) + K_d(\dot{\theta} - \dot{q}), \quad (1)$$

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + K_s(\theta - q) + K_d(\dot{\theta} - \dot{q}) = u. \quad (2)$$

其中: q, \dot{q}, \ddot{q} 分别为关节角向量、角速度向量和角加速度向量; $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 分别为电机转角向量、角速度向量和角加速度向量; M 为关节转动惯量矩阵; C 为哥氏力和离心力矩阵; G 为重力项; J 为电机转动惯量矩阵; D 为电机阻尼矩阵; K_s, K_d 分别为关节刚度矩阵和阻尼矩阵; u 为电机输出力矩,即控制输入量.

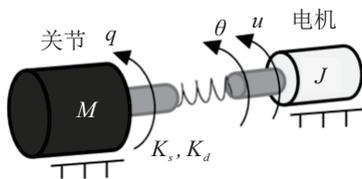


图3 柔性关节简化模型

联立式(1)和(2),得到由电机直接驱动时的绳驱动机械臂动力学模型为

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + G + J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + \tau_{\text{ext}} = u, \quad (3)$$

其中 τ_{ext} 为干扰力矩.

实际上,绳驱动机械臂精确动力学模型通常是难

以获得的,故引入一个对角增益矩阵 \bar{M} 以估计系统的动态特性,则式(3)可改写为

$$u = \bar{M}\ddot{q} + N, \quad (4)$$

其中

$$N = (M - \bar{M})\ddot{q} + C\dot{q} + G + J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + \tau_{\text{ext}}$$

为包含系统不确定性和外部干扰的集总干扰.

2 控制器设计

2.1 LESO的设计

由式(4)可见,该系统实质上由2个二阶子系统构成,但是系统中的集总干扰项极为复杂且具有很强的非线性,很难通过常规方法获得,故本节引入LESO对集总干扰进行估计.为简化设计过程,以关节1为例演绎所提出控制器的设计过程,即

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = \bar{M}_1^{-1}(u_1 - N_1), \\ y_1 = q_1, \end{cases} \quad (5)$$

其中 y_1 为系统输出.

将式(5)改写为状态空间方程形式,即

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ef, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$x = [q_1, \dot{q}_1]^T, u = u_1, y = y_1, f = -\bar{M}_1^{-1}N_1,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{M}_1^{-1} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T.$$

假设干扰 N_1 可微,则可将其扩张为一个新的状态量 x_3 ,则式(6)可写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}u + \bar{E}h, \\ y = \bar{C}z. \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\bar{z} = [q_1, \dot{q}_1, x_3]^T, h = \dot{f}, x_3 = -\bar{M}_1^{-1}N_1,$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{M}_1^{-1} \end{bmatrix}, \bar{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T.$$

构造系统(5)的扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = \mathbf{A}\hat{z} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}(y - \hat{y}), \\ \hat{y} = \mathbf{C}\hat{z}. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\hat{z} = [\hat{q}_1, \hat{q}_1, \hat{x}_3]^T$, \hat{z} 为 z 的估计值; $\hat{q}_1, \hat{q}_1, \hat{x}_3$ 为状态观测量; \hat{y} 为系统输出值; $\mathbf{L} = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]^T = [\xi_1\omega_0, \xi_2\omega_0, \xi_3\omega_0]^T$ 为观测器增益矩阵, $\omega_0 > 0$ 为观测器带宽, 通过极点配置法^[20] 选取合适的 $\xi_i (i = 1, 2, 3)$ 可使观测器跟踪系统(5)中的各个状态变量.

2.2 STA-FONTSM 设计

以关节1为例推演控制器设计过程. 定义关节1的轨迹跟踪误差及其一阶导数为 $e_1 = q_{1r} - \hat{q}_1, \dot{e}_1 = \dot{q}_{1r} - \dot{\hat{q}}_1$. 为了保证在滑动阶段能够实现快速收敛, 设计如下分数阶非奇异终端滑模面:

$$s_1 = \dot{e}_1 + a_{11}D^{b_{11}}[\text{sig}(e_1)^{c_{11}}] + a_{21}D^{b_{21}-1}[\text{sig}(e_1)^{c_{21}}]. \quad (9)$$

其中: $0 < b_{11}, b_{21}, c_{11}, c_{21} < 1, a_{11}, a_{21}$ 为常数. 符号 $\text{sig}(x)^\alpha = |x|^\alpha \text{sign}(x), D^\alpha (0 < \alpha < 1)$ 为 Riemann-Liouville 型分数阶导数和积分, 其具体定义如下.

定义1^[21] 函数 $f(t)$ 关于时间 t 的 Riemann-Liouville 型分数阶导数和积分的定义分别为

$$\frac{d^\alpha f(t)}{dt^\alpha} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau, \quad (10)$$

$$t_0 I_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau. \quad (11)$$

其中: t_0 为积分下限, $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 为分数阶的阶次, $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty e^{-t} t^{\alpha-1} dt$ 为 Gamma 函数. 为了便于叙述, 本文用 D^α 表示 $t_0 D_t^\alpha$.

对式(9)求导, 并代入(5)可得

$$\dot{s}_1 = \ddot{q}_{1r} - \bar{M}_1^{-1}(u_1 - N_1) + a_{11}D^{b_{11}+1}[\text{sig}(e_1)^{c_{11}}] + a_{21}D^{b_{21}}[\text{sig}(e_1)^{c_{21}}]. \quad (12)$$

进一步地, 为了确保在到达阶段也具有较强的鲁棒性并同时抑制控制输入的抖振, 引入一种改进的超螺旋算子

$$\dot{s}_1 = -\rho_{11}\text{sig}(s_1)^{0.5} - \rho_{21}s_1 + \mu_1, \quad (13)$$

$$\dot{\mu}_1 = -\rho_{31}\text{sgn}(s_1) - \rho_{41}s_1, \quad (14)$$

其中 $\rho_{11}, \rho_{21}, \rho_{31}, \rho_{41}$ 为控制器参数.

联立式(12)~(14), 得到关节1的控制律为

$$u_1 = \bar{M}_1\varphi_1 + \hat{N}_1, \\ \varphi_1 = \ddot{q}_{1r} + a_{11}D^{b_{11}+1}[\text{sig}(e_1)^{c_{11}}] + a_{21}D^{b_{21}}[\text{sig}(e_1)^{c_{21}}] + \rho_{11}\text{sig}(s_1)^{0.5} + \rho_{21}s_1 + \rho_{31} \int_0^t \text{sgn}(s_1) dt + \rho_{41} \int_0^t s_1 dt. \quad (15)$$

由式(15)可得到关节1控制器的结构, 如图4所示. 同理, 关节2的控制律为

$$u_2 = \bar{M}_2\varphi_2 + \hat{N}_2, \\ \varphi_2 = \ddot{q}_{2r} + a_{12}D^{b_{12}+1}[\text{sig}(e_2)^{c_{12}}] + a_{22}D^{b_{22}}[\text{sig}(e_2)^{c_{22}}] + \rho_{12}\text{sig}(s_2)^{0.5} + \rho_{22}s_2 + \rho_{32} \int_0^t \text{sgn}(s_2) dt + \rho_{42} \int_0^t s_2 dt. \quad (16)$$

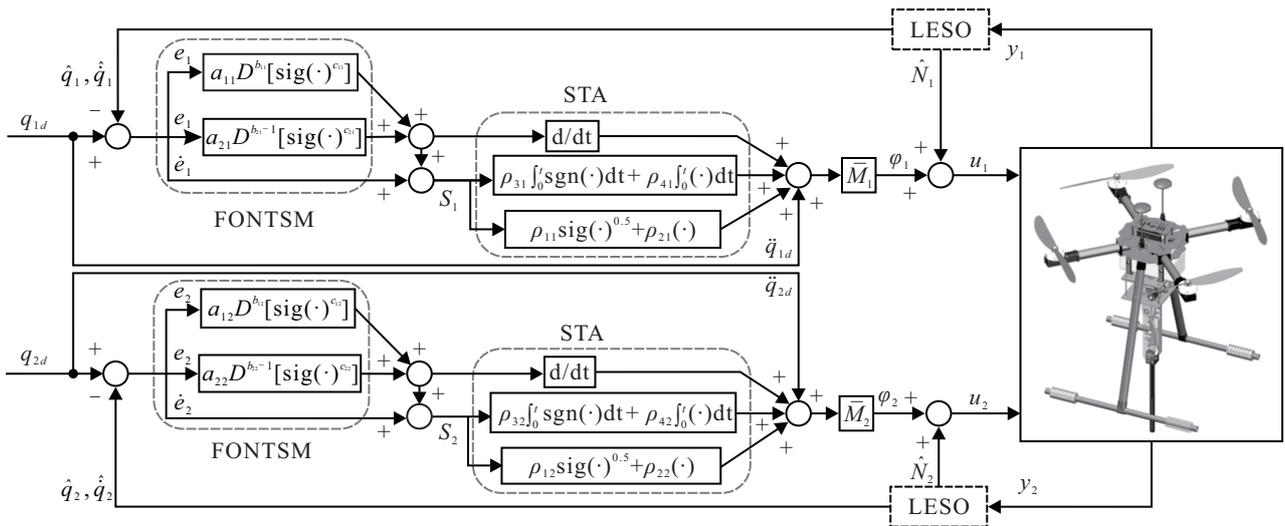


图4 本文控制器结构

3 稳定性分析

将控制律(15)代入式(5), 得到系统的误差动力学方程为

$$\dot{s}_1 = -\rho_{11}\text{sig}(s_1)^{0.5} - \rho_{21}s_1 + \mu_1,$$

$$\dot{\mu}_1 = -\rho_{31}\text{sgn}(s_1) - \rho_{41}s_1 + \varepsilon_1, \quad (17)$$

其中 $\varepsilon_1 = \bar{M}_1^{-1}(N_1 - \hat{N}_1) = \bar{M}_1^{-1}N_1 - \hat{x}_3$ 为 LESO 的估计误差.

定理1^[22] 假设对于系统(5),观测器估计误差 ε_1 的导数满足 $|\dot{\varepsilon}_1| \leq \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12}|s_1|$ ($\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12} > 0$),且控制器参数 $\rho_{11}, \rho_{21}, \rho_{31}, \rho_{41}$ 满足

$$\begin{aligned} \rho_{11} &> 2\varepsilon_{11}^{1/2}, \rho_{21} > (2\varepsilon_{12})^{1/2}, \rho_{31} > \varepsilon_{11}, \\ \rho_{41} &> \frac{\rho_{11}^3(2\rho_{21} - \varepsilon_{12}) + (5\rho_{21}^2 + 2\varepsilon_{12})k_{11}}{2k_{11} - \rho_{11}^3}, \\ k_{11} &= \rho_{11}\left(\frac{1}{4}\rho_{11}^2 - \varepsilon_{11}\right) + \frac{1}{2}\rho_{11}\left(\frac{1}{2}\rho_{11}^2 + 2\rho_{31}\right), \end{aligned} \quad (18)$$

则控制律(15)可保证关节1的滑模面 s_1 、跟踪误差 e_1 及其导数 \dot{e}_1 在有限时间内收敛至0.

为便于证明,引入一个新的向量 $\eta = [\text{sig}(s_1)^{1/2}, s_1, \mu_1]^T$,初始值设为 $\eta(0)$. 选择Lyapunov函数为

$$\begin{aligned} V(\eta) &= 2\rho_{31}|s_1| + \rho_{41}s_1^2 + \frac{1}{2}\mu_1^2 + \\ &\frac{1}{2}(\rho_{11}\text{sig}(s_1)^{1/2} + \rho_{21}s_1 - \mu_1)^2. \end{aligned} \quad (19)$$

将式(19)写为如下矩阵形式:

$$V(\eta) = \eta^T \Phi \eta, \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi^T = \\ &\frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\rho_{11}^2 + 4\rho_{31}) & \rho_{11}\rho_{21} & -\rho_{11} \\ \rho_{11}\rho_{21} & (\rho_{21}^2 + 2\rho_{41}) & -\rho_{21} \\ -\rho_{11} & -\rho_{21} & 2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

对于所选择的Lyapunov函数,有

$$\lambda_{\min}\{\Phi\}\|\eta\|_2^2 \leq V(\eta) \leq \lambda_{\max}\{\Phi\}\|\eta\|_2^2. \quad (21)$$

其中: $\|\eta\|_2^2 = |s_1| + s_1^2 + \mu_1^2$ 为 η 的欧氏范数, $\lambda_{\min}\{\Phi\}$ 、 $\lambda_{\max}\{\Phi\}$ 分别为 Φ 的最大和最小特征值.

对式(20)关于时间求导,得到

$$\dot{V}(\eta) = -\frac{1}{|s_1|^{1/2}}\eta^T \Phi_1 \eta - \eta^T \Phi_2 \eta + \varphi_1^T \eta. \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_1^T = \\ &\frac{\rho_{11}}{2} \begin{bmatrix} (\rho_{11}^2 + 2\rho_{31}) & 0 & -\rho_{11} \\ 0 & (5\rho_{21}^2 + 2\rho_{41}) & -3\rho_{21} \\ -\rho_{11} & -3\rho_{21} & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \Phi_2^T = \\ &k_{21} \begin{bmatrix} (2\rho_{11}^2 + \rho_{31}) & 0 & 0 \\ 0 & (\rho_{21}^2 + \rho_{41}) & -\rho_{21} \\ 0 & -\rho_{21} & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\varphi_1^T = [-\rho_{11}\dot{\varepsilon}_1 \quad -\rho_{21}\dot{\varepsilon}_1 \quad 0].$$

观测误差的导数满足 $|\dot{\varepsilon}_1| \leq \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12}|s_1|$,则有

$$\dot{\varphi}_1^T \eta \leq \frac{1}{|s_1|^{1/2}}\eta^T \Delta_1 \eta + \eta^T \Delta_2 \eta. \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{bmatrix} \rho_{11}\varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{11}\varepsilon_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \Delta_2 &= \begin{bmatrix} \rho_{21}\varepsilon_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{21}\varepsilon_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

将式(23)代入(22),得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(\eta) &\leq \\ &-\frac{1}{|s_1|^{1/2}}\eta^T(\Phi_1 - \Delta_1)\eta - \eta^T(\Phi_2 - \Delta_2)\eta \leq \\ &-\frac{1}{|s_1|^{1/2}}\lambda_{\min}(\Phi_1 - \Delta_1)\|\eta\|_2^2 - \lambda_{\min}(\Phi_2 - \Delta_2)\|\eta\|_2^2. \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)可知,只有当 $(\Phi_1 - \Delta_1) > 0$ 且 $(\Phi_2 - \Delta_2) > 0$ 时, $\dot{V}(\eta)$ 才能负定. 但是,只要根据式(18)选择合适的 $\rho_{11}, \rho_{21}, \rho_{31}, \rho_{41}$ 便可满足上述条件.

考虑到 $|s_1|^{1/2} \leq \|\eta\|_2 \leq V^{1/2}(\eta)/\lambda_{\min}^{1/2}\{\Phi\}$,则有

$$\dot{V}(\eta) \leq -\gamma_1 V^{1/2}(\eta) - \gamma_2 V(\eta). \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\lambda_{\min}^{1/2}\{\Phi\}\lambda_{\min}\{\Phi_1 - \Delta_1\}}{\lambda_{\max}\{\Phi\}}, \\ \gamma_2 &= \frac{\lambda_{\min}\{\Phi_2 - \Delta_2\}}{\lambda_{\max}\{\Phi\}}. \end{aligned}$$

由式(25)可推出 $V(\eta)$ 和 η 能够在时间 $T_1 = 2V^{1/2}(\eta(0))/\gamma_1$ 内收敛至0,同时FONTSM滑模面 s_1 也能够在此时间内收敛至0,故 $\dot{e}_1 + a_{11}D^{b_{11}}[\text{sig}(e_1)^{c_{11}}] + a_{21}D^{b_{21}-1}[\text{sig}(e_1)^{c_{21}}] = 0$ 可推出关节1跟踪 e_1 及其导数 \dot{e}_1 能够在有限时间内收敛至0.

同理,根据上述推导过程也可证明关节2跟踪误差及其导数能够在有限时间内收敛至0.

4 仿真算例

为验证所设计控制器的有效性,在Matlab/Simscape环境中对绳驱动空中机械臂进行可视化运动仿真,具体可视化运动过程如图5所示.在仿真中将四旋翼飞行器设定为悬停状态,机械臂参考轨迹通过Cycloidal曲线^[23]设计(设置角度变化范围为 $0^\circ \sim 40^\circ$),两关节初始角度设置为 0° 和 82.6° .考虑到机械臂在实际工作时会面临阵风、绳索柔性变形和机械振动等扰动的影响,因此添加幅值为0.1N高斯噪声作为干扰力矩,仿真时间设置为15s.同时为了体现所设计控制器的优越性,引入文献[24]提出的PD-LESO和文献[25]提出的NTSMC与本文控制器进行对比分析.3种控制器的参数在Simulink中通过经验试凑法整定,最终选定的参数如表1所示.

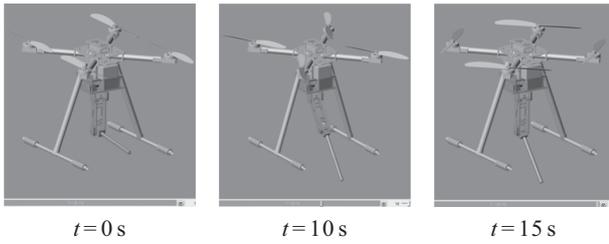
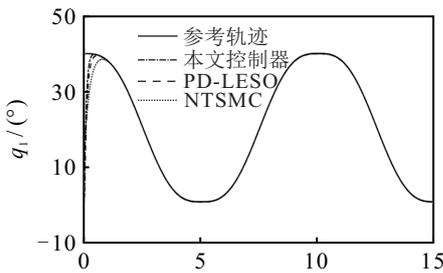


图5 绳驱动空中机械臂的可视化运动

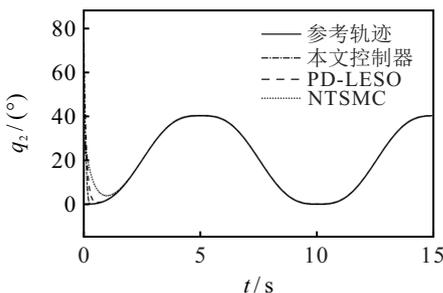
表1 3种控制器参数

控制器	控制器参数
本文控制器	$\bar{M}_1 = 0.001, a_{11} = 1, a_{21} = 1,$ $b_{11} = 0.5, b_{21} = 0.5, c_{11} = 0.9,$ $c_{21} = 0.9, \rho_{11} = 600, \rho_{12} = 300$ $\bar{M}_2 = 0.005, a_{12} = 1, a_{22} = 1,$ $b_{12} = 0.5, b_{22} = 0.7, c_{12} = 0.7,$ $c_{22} = 0.7, \rho_{21} = 100, \rho_{22} = 300$
PD-LESO	$\omega_{c1} = 45, \omega_{c2} = 100, \omega_{o1} = 286, \omega_{o2} = 142$
NTSMC	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 1.8, \beta_1 = 0.3, \beta_2 = 0.6,$ $k_1 = 1, k_2 = 2, \phi_1 = 0.2, \phi_2 = 0.5$

仿真结果如图6~图8所示. 图6为机械臂的关节角响应. 由图6可见, 虽然3种控制器均能够在有限时间内对参考轨迹的跟踪, 但所设计控制器的收敛速度明显优于另外两种. 图7为关节角的轨迹跟踪误差. 由图7可见, 所设计控制器的跟踪精度要远远高于另外两种控制器, 具有较好的稳定性能. NTSMC由于无法估计集总干扰, 抗干扰能力较差; PD-LESO虽然可以抑制集总干扰, 但无法消除系统的静态误差, 故控制精度没有所设计控制器高. 图8为3种控制器的输出力矩响应. 由图8可见, NTSMC存在明显的

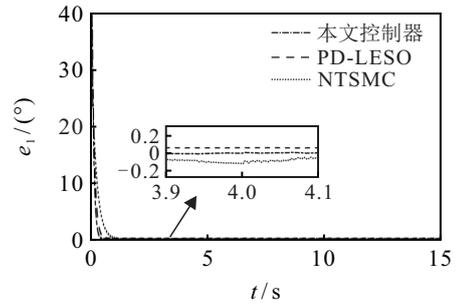


(a) 关节1角度

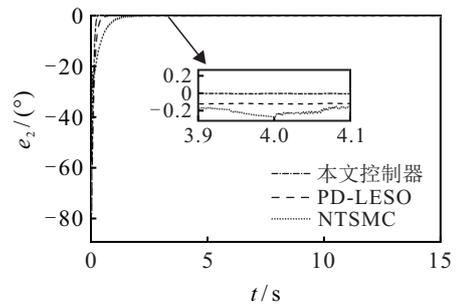


(b) 关节2角度

图6 仿真中关节角位移响应

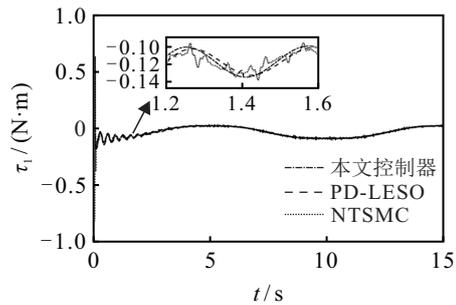


(a) 关节1误差

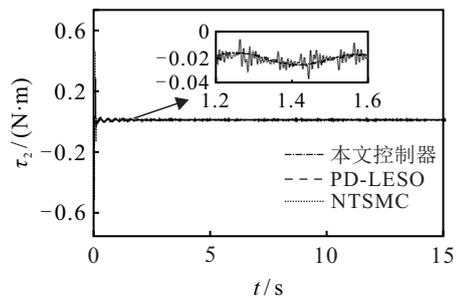


(b) 关节2误差

图7 仿真中关节角跟踪误差



(a) 关节1力矩



(b) 关节2力矩

图8 仿真中关节力矩响应

抖振现象, 而所设计控制器结构中的LESO和STA使其能够有效抑制抖振, 故输出力矩较为平坦. 上述分析验证了将STA、FONTSM与LESO相结合所设计的控制器的有效性, 同时验证了该控制器具有较快的收敛速度、较高的跟踪精度以及较强的鲁棒性.

5 实验验证

为了进一步验证所设计控制器在实际作业任务下的控制效果, 本节进行了地面测试实验, 用于测试的平台如图9所示. 其中, 绳驱动机械臂的2个驱动电机均放置于吊舱内, 电机型号为RoboMaster M2006

直流减速电机,减速比为36:1,额定转速为500 rpm,额定扭矩为1/(N·m),驱动器则采用电机配套的RoboMaster C 610;关节处安装的编码器型号为AMT 102-V,其分辨率为0.044°。机械臂控制系统通过Matlab/xPC平台实现,在宿主机的Simulink中编写的控制器程序经过编译后下载至目标机中,目标机将PCI6225e板卡采集到的实际关节位置与期望关节位置作差并计算出驱动力矩,然后力矩信号通过PCI6225e板卡传递给电机驱动器,从而控制电机转动实现机械臂的闭环控制。

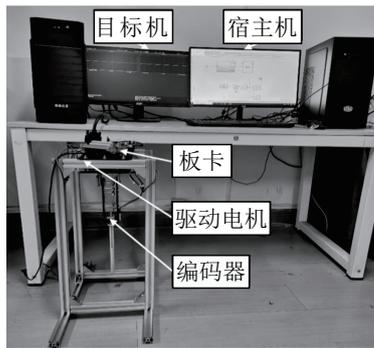


图9 地面测试平台

实验中,设置两关节的参考轨迹是幅值为40°的谐波信号,采样频率设置为1 kHz。同样地,为了验证所设计控制器的优越性,引入PD-LESO和NTSMC与所设计控制器进行对比,各控制器参数按表1中选取,实验结果如图10~图12所示。由10~图12可见,

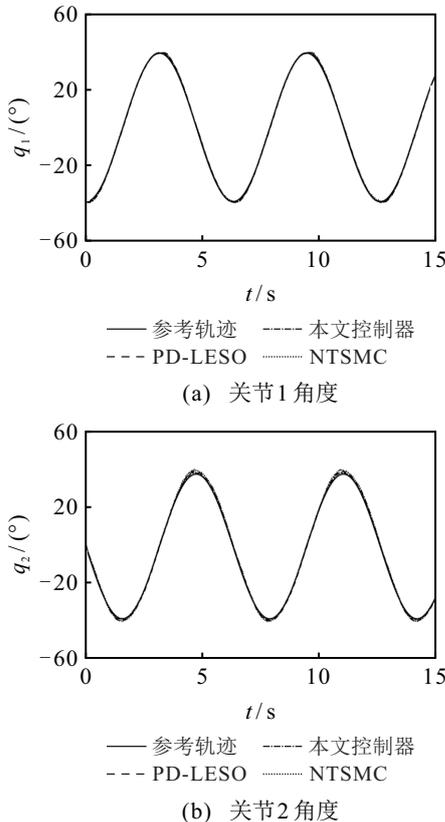


图10 3种控制器下关节角响应对比

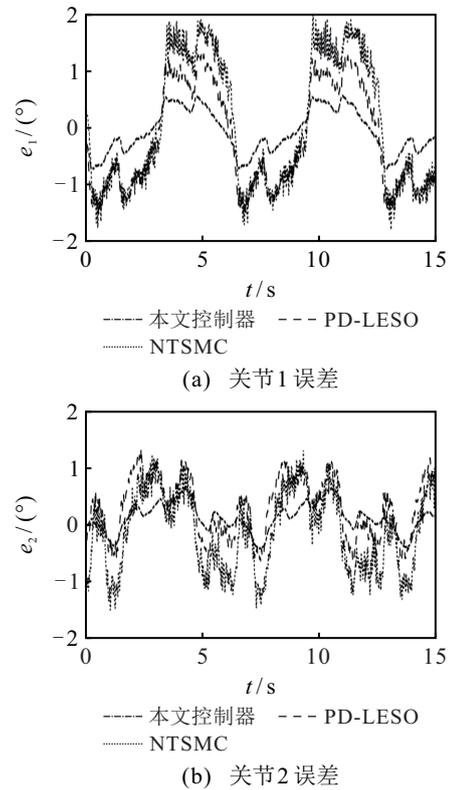


图11 3种控制器下关节角跟踪误差

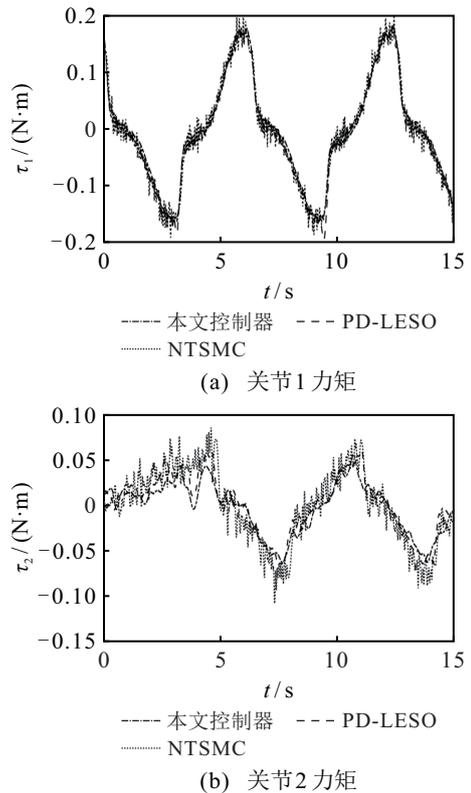


图12 3种控制器输出力矩对比

表2 跟踪误差均方根及最大值

控制器	关节1误差 $e_1/(^\circ)$		关节2误差 $e_2/(^\circ)$	
	RMSE	ME	RMSE	ME
本文控制器	0.3485	0.8626	0.3865	0.6817
PD-LESO	0.8233	1.3385	0.8346	1.3283
NTSMC	1.0607	1.9855	0.9583	1.5344

q_1 和 q_2 在3种控制器作用下均可以有效地跟踪参考轨迹,但是在关节换向处均有较大的位置误差,这可能是绳索在关节换向时会由松变紧造成的.进一步地,采用均方根误差RMSE和绝对最大误差ME量化两关节的轨迹跟踪误差,如表2所示.由表2可见,对于 q_1 ,所设计控制器的RMSE分别比PD-LESO和NTSMC低了57.67%、67.14%,ME分别低了35.56%、56.56%;对于所设计控制器的RMSE分别比PD-LESO和NTSMC低了35.56%、59.57%,ME分别低了48.68%、55.58%.

最后,图12为两关节的输入力矩对比,由图12可见,PD-LESO和NTSMC的力矩存在明显抖振现象,这主要是由于绳索柔性的存在使得机械臂在运动时不可避免地存在振动,而所设计控制器结构中的LESO使其能够有效估计这些扰动并给予补偿,同时STA算子也可有效地抑制滑模的抖振现象,故其输出力矩最为平坦且无抖振.以上实验结果与前文在Simscape中的仿真结果基本一致,验证了所设计控制器的有效性和较好的综合控制性能.

6 结论

本文设计了一款绳驱动空中机械臂,并讨论其结构设计、动力学建模以及关节空间轨迹跟踪控制器设计,旨在完成排污管道口的水质采样任务.得到如下结论.

1)降低了机械臂与飞行器间的质量比,减小了两者间的耦合效应,增长了空中机械臂系统的续航时间,扩大了其负载能力,使得整个系统具有较好的位姿稳定性能.

2)仿真中,所设计的控制器表现出比PD-LESO与NTSMC更优的控制性能.同时,可视化可为控制器的参数整定与性能评估提供平台.

3)在地面测试实验中,两个关节角在所设计控制器下的RMSE和ME均要小于PD-LESO与NTSMC,验证了所设计控制器具有较好的工程应用价值,能够帮助绳驱动空中机械臂完成关节空间内的轨迹跟踪控制任务.

在后续的研究中,会进一步研究四旋翼飞行器与绳驱动机械臂间的耦合关系,并设计绳驱动空中机械臂的混合控制策略.此外,也会在户外进行实际采水工况实验以验证所设计控制策略的有效性.

参考文献(References)

- [1] Amin R, Li A J, Shamshirband S. A review of quadrotor UAV: Control methodologies and performance evaluation[J]. *International Journal of Automation and Control*, 2016, 10(2): 87.
- [2] Gonçalves J A, Henriques R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 104: 101-111.
- [3] Ollero A, Heredia G, Franchi A, et al. The AEROARMS project: Aerial robots with advanced manipulation capabilities for inspection and maintenance[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2018, 25(4): 12-23.
- [4] Pablo R S, Robert B, Bego A, et al. Extracting objects for aerial manipulation on UAVs using low-cost stereo sensors[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 700.
- [5] Ramon Soria P, Arrue B, Ollero A. Detection, location and grasping objects using a stereo sensor on UAV in outdoor environments[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 103.
- [6] Xu W, Wang Y Y, Jiang S R, et al. Kinematic analysis of a newly designed cable-driven manipulator[J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2018, 42(2): 125-135.
- [7] Babaghasabha R, Khosravi M A, Taghirad H D. Adaptive robust control of fully constrained cable robots: Singular perturbation approach[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 85(1): 607-620.
- [8] Wang Y Y, Zhu K W, Chen B, et al. Model-free continuous nonsingular fast terminal sliding mode control for cable-driven manipulators[J]. *ISA Transactions*, 2020, 98: 483-495.
- [9] Silva Lima G, Porto D R, de Oliveira A J, et al. Intelligent control of a single-link flexible manipulator using sliding modes and artificial neural networks[J]. *Electronics Letters*, 2021, 57(23): 869-872.
- [10] Jimenez-Cano A E, Heredia G, Bejar M, et al. Modelling and control of an aerial manipulator consisting of an autonomous helicopter equipped with a multi-link robotic arm[C]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(10): 1860-1870.
- [11] Wang H Z, Fang L J, Hu M H, et al. Adaptive funnel fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators with dynamic uncertainties[J]. *Archive Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996*, 2020, 235(18): 3678-3693.
- [12] 黄道敏, 韩丽君, 唐国元, 等. 水下机械手分数阶积分滑模轨迹跟踪控制方法研究[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(13): 1513-1518.
(Huang D M, Han L J, Tang G Y, et al. Fractional integral sliding mode control for trajectory tracking of underwater manipulators[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019,

- 30(13): 1513-1518.)
- [13] Wang Y Y, Gu L Y, Xu Y H, et al. Practical tracking control of robot manipulators with continuous fractional-order nonsingular terminal sliding mode[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6194-6204.
- [14] Kali Y, Saad M, Benjelloun K. Optimal super-twisting algorithm with time delay estimation for robot manipulators based on feedback linearization[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 108: 87-99.
- [15] 常晶, 周军. 一种基于时变干扰观测器的高超声速飞行器容错控制策略设计[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1893-1900.
(Chang J, Zhou J. A FTC scheme for hypersonic vehicle based on adaptive disturbance observer[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1893-1900.)
- [16] Shi X P, Liu S R, Liu F. New robust control strategy for module manipulators via sliding mode control with an extended state observer[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2010, 224(5): 545-555.
- [17] 徐海祥, 胡聪. 基于LESO无人水下飞行器鲁棒动态面悬停控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49(8): 98-103.
(Xu H X, Hu C. Robust dynamic surface controller for hovering control of unmanned underwater vehicle based on LESO[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2021, 49(8): 98-103.)
- [18] 杨斌, 何玉庆, 韩建达, 等. 作业型飞行机器人研究现状与展望[J]. 机器人, 2015, 37(5): 628-640.
(Yang B, He Y Q, Han J D, et al. Survey on aerial manipulator systems[J]. Robot, 2015, 37(5): 628-640.)
- [19] Jin M L, Lee J, Tsagarakis N G. Model-free robust adaptive control of humanoid robots with flexible joints[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1706-1715.
- [20] Gao J D, Zhuang Y, Xiao J Z, et al. Attitude tracking control of a quadrotor based on linear active disturbance rejective control[C]. IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Shenyang, 2015: 287-292.
- [21] Coronel-Escamilla A, Gómez-Aguilar J F, Torres L, et al. A numerical solution for a variable-order reaction-diffusion model by using fractional derivatives with non-local and non-singular kernel[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 491: 406-424.
- [22] Moreno J A, Osorio M. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers[C]. The 47th IEEE Conference on Decision and Control. Cancun, 2008: 2856-2861.
- [23] Bone G M, Xue M, Flett J. Position control of hybrid pneumatic-electric actuators using discrete-valued model-predictive control[J]. Mechatronics, 2015, 25(6): 1-10.
- [24] Huang J, Cen Y. Research on variable mass control of series manipulator based on linear active disturbance rejection control[J]. Measurement and Control, 2020, 53(7/8): 1194-1202.
- [25] Wang Y Y, Chen J W, Gu L Y, et al. Time delay control of hydraulic manipulators with continuous nonsingular terminal sliding mode[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12): 4616-4624.

作者简介

姚勇(1998—), 男, 硕士生, 从事空中机器人控制技术的研究, E-mail: robotyaoyong@163.com;

丁力(1989—), 男, 副教授, 博士, 从事机器人动力学建模与控制、智能算法等研究, E-mail: nuaadli@163.com;

马瑞(1989—), 男, 讲师, 博士生, 从事旋翼飞行器动力学与控制的研究, E-mail: nuaamarui@163.com;

王尧尧(1989—), 男, 副教授, 博士, 从事仿生飞行机械臂、绳驱动系统等研究, E-mail: yywang_cmee@nuaa.edu.cn.

(责任编辑: 魏冰)