

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.049

面向水质采样的绳驱动空中机械臂抗干扰控制

丁力¹ 姚勇¹ 巢渊¹ 王尧尧² 吴洪涛²

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

摘要: 绳驱动空中机械臂是一种由旋翼飞行器和多自由度机械臂构成的新型机器人系统。为了增强机械臂在排污管口水质采样时的关节空间控制性能,提出了一种结合快速连续非奇异终端滑模控制与线性扩张状态观测器的抗干扰控制策略。阐述了绳驱动空中机械臂的结构设计,建立计及关节柔性的动力学模型。利用线性扩张状态观测器来估计与补偿系统集总干扰,采用快速连续非奇异终端滑模面来保证系统状态量的有限时间收敛和抑制控制力矩的抖振。通过李雅普诺夫稳定性定理分析了所设计控制器的稳定性。最后,通过可视化仿真和地面汲水试验验证了所提控制器的有效性,结果表明,所提控制器的收敛速度、鲁棒性、准确性和抗干扰能力优于其他两种控制器,能有效抑制系统抖振,满足水质采样的作业需求。

关键词: 空中机械臂; 水质采样; 终端滑模; 线性扩张状态观测器; 集总干扰

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)08-0452-07

OSID:



Disturbance Rejection Control for Cable-driven Aerial Manipulator Applied on Water Samples

DING Li¹ YAO Yong¹ CHAO Yuan¹ WANG Yaoyao² WU Hongtao²

(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: Cable-driven aerial manipulator is considered as a novel robotic system which contains an aircraft and a multiple degree-of-freedom manipulator. The cable-driven manipulator is a typical nonlinear system with extremely complex dynamics, which may lead to inadequate control performance when subjected to lumped disturbances. A disturbance rejection controller was proposed to enhance the tracking performance of the aerial manipulator in joint space faced water samples at drain mouth. This controller synthesized fast continuous nonsingular terminal sliding mode technique and linear extended state observer. Firstly, the structural design of the aerial manipulator was introduced and dynamics model considering flexible joint was established. Secondly, the linear extended state observer was used to estimate and compensate the lumped disturbances, and fast continuous nonsingular terminal sliding mode technique was applied to ensure the system states can converge in finite time and restrain the chattering of the control torques. Furthermore, stability of the controller was proved by Lyapunov theory. Lastly, the efficiency of the proposed controller was tested through visual simulation and ground water sampling experiments. The results showed that the proposed controller had faster converge, stronger robustness, higher precision, and greater performance of disturbance rejection compared with the other two controller, which can satisfy the needs of water samples.

Key words: aerial manipulator; water samples; terminal sliding mode; linear extended state observer; lumped disturbances

0 引言

水质采样是了解水环境的途径,也是水样调查

和监控的关键^[1]。当前水质采样主要依赖人工,作业效率不高且费时耗力。虽然也存在一些机械采样设备,但大都只能采集从排污口排入到湖泊或河流

收稿日期: 2021-08-27 修回日期: 2021-09-28

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

作者简介: 丁力(1989—),男,副教授,博士,主要从事机器人动力学建模与控制 and 智能算法研究, E-mail: nuaadli@163.com

中的水样,由于污水被稀释,故样本数据的可靠性和精确性无法保障。绳驱动空中机械臂可在三维空间中自由飞行,具有工作空间大、灵活性高、结构轻巧的特点^[2-3],可以有效解决排污管口水质采样问题。然而,绳驱动空中机械臂是一个典型的非线性系统,表现出极其复杂的动力学特性,很难保证其作业时的位姿稳定性。同时,驱动绳索的柔性变形以及外界干扰又会进一步加剧系统的非线性因素。

近年来,国内外学者们对空中机械臂控制技术进行了研究,主要控制器有积分反步法控制^[4]、神经网络模糊控制^[5]、 H_∞ 鲁棒控制^[6]、滑模控制 (Sliding mode control, SMC)^[7] 等。其中,SMC 因其鲁棒性好、结构简单、对参数不敏感等优点,广泛应用于机电系统控制。由于 SMC 结构中含有切换函数,会产生抖振现象。为此,MA 等^[8] 在滑模面中加入高阶非线性函数,提出了终端滑模控制 (Terminal SMC, TSMC),有效削弱了抖振,但也带来不连续和奇异性问题。进而,YI 等^[9] 提出了快速连续非奇异终端滑模控制策略 (Fast nonsingular TSMC, FNTSMC),解决了奇异性问题,加快了系统状态量的收敛速度。文献[10-11]采用此类控制器解决绳驱动工业机械臂和压电定位系统的控制问题。另外,绳驱动机械臂存在的由内部不确定性和外部扰动构成的集总干扰往往会影响关节角的稳态性能,从而降低系统整体的控制品质。文献[12-13]研究表明,扰动观测器能有效估计与补偿集总干扰,提高系统的抗干扰能力。在扰动观测器中,线性扩张状态观测器 (Linear extended state observer, LESO) 具有能耗小、易于工程实现的特点,被成功嵌入到反步法控制^[14]、自适应控制^[15]、PD (Proportion differentiation, PD) 控制^[16] 等结构中。

本文拟结合 LESO 和 FNTSMC 的优势,提出一种新型抗干扰控制策略以解决绳驱动空中机械臂的关节空间轨迹跟踪控制问题,旨在提高其在排污管口水质采样时的操控品质。设计机械臂的三维样机,阐述机械臂的工作原理,推导机械臂的动力学模型,明确系统输入输出关系,进而根据不基于模型的思想设计各关节的抗干扰控制器,实现绳驱动机械臂的汲水动作。最后,通过可视化仿真和地面试验对本文所提控制器的有效性进行验证。

1 系统描述

1.1 结构设计

本文设计的面向水质采样的绳驱动空中机械臂虚拟样机如图 1 所示,主要由四旋翼飞行器、二自由度绳驱动机械臂及吊舱组成。其中,四旋翼飞行器

上装有飞行控制器、电机、桨叶及电调等航空电子设备,吊舱用于放置锂电池、水泵、水箱与驱动电机。所设计样机的工作原理为:先控制四旋翼飞行器悬停至排污管口附近,再操控绳驱动机械臂将末端执行器伸入管道口内汲水采样。需要指出的是,本文工作仅研究绳驱动机械臂的运动控制,而不涉及旋翼飞行器的动态性能。



图 1 水质采样空中机械臂样机

Fig. 1 Prototype of aerial manipulator for water samples

与现有空中机械臂相比,本文设计的机械臂采用绳驱动技术,如图 2 所示,将直流减速电机放置在基座处,下方电机通过驱动轮上缠绕的两根绳索拉动大臂关节 1 正反转,上方电机通过主动轮、导向轮及张紧轮将力矩传递到小臂关节 2 处,最终实现末端执行器的汲水运动。这种设计可有效减轻臂身质量和关节惯量,提高末端负载自重比,同时兼具结构轻巧、减振吸振的优点。

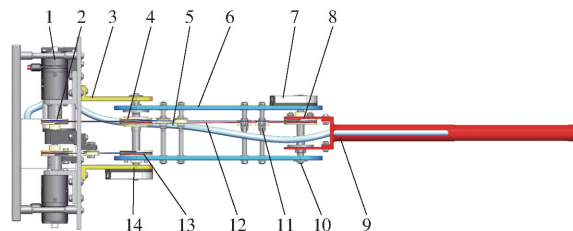


图 2 绳驱动机械臂三维模型

Fig. 2 3D model of cable-driven manipulator

1. 直流减速电机 2. 主动轮 3. 大臂 4. 导向轮 5. 吸水管
6. 小臂 7. 编码器 8. 关节轮 2 9. 末端执行器 10. 关节 2
11. 张紧轮 12. 驱动绳索 13. 关节轮 1 14. 关节 1

1.2 动力学模型

在绳驱动空中机械臂中,电机到关节的动力靠柔绳来传递,故可将柔绳的柔性效应集中到关节处,即等效成柔性关节。根据课题组前期研究^[17],计及关节柔性的 $n(n=2)$ 自由度绳驱动机械臂的动力学模型可描述为

$$I_m \ddot{\theta} + D_m \dot{\theta} = \tau - \tau_s \quad (1)$$

$$\tau_s = K_s(\theta - q) + D_s(\dot{\theta} - \dot{q}) \quad (2)$$

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau_s + \tau_d \quad (3)$$

式中 θ ——电机转子角位移

I_m ——电机惯性

D_m ——电机阻尼

τ ——电机输出力矩
 q ——机械臂关节角位移
 τ_s ——机械臂关节输出力矩
 K_s ——机械臂关节刚度
 D_s ——机械臂关节阻尼
 $M(q)$ ——关节惯性
 $C(q, \dot{q})$ ——哥氏力和离心力项
 $G(q)$ ——重力项 τ_d ——扰动项
 \dot{q} ——关节角速度
 \ddot{q} ——关节角加速度

将式(3)代入式(1)中,可得

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + I_m\ddot{\theta} + D_m\dot{\theta} = \tau + \tau_d \quad (4)$$

最后,引入一个常对角增益矩阵 \bar{M} 将式(4)转换为

$$\begin{cases} \tau = \bar{M}\ddot{q} + H \\ H = (M - \bar{M})\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + I_m\ddot{\theta} + D_m\dot{\theta} - \tau_d \end{cases} \quad (5)$$

式中 H ——包含未建模特性及外部扰动集总干扰

2 抗干扰控制器设计

2.1 LESO 设计

本文控制器设计只依赖被控对象输入、输出数据。式(5)实际上是一个二阶系统,故以关节角 q_1 来推演本文控制器的设计过程,即

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = \bar{M}_1^{-1}(\tau_1 - H_1) \\ y_1 = q_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 y_1 ——系统输出

将式(6)改写成状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ef \\ y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

其中 $x = [q_1 \quad \dot{q}_1]^T$ $u = \tau_1$
 $y = y$ $f = H_1$

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

引入一个扩张状态量 x_3 来表征集总干扰,则式(7)转换为

$$\begin{cases} \dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}u + \bar{E}h \\ y = \bar{C}z \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\bar{z} = [q_1 \quad \dot{q}_1 \quad x_3]^T$
 $h = \dot{f}$ $x_3 = f$

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

设计式(8)的线性扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = \hat{A}\hat{z} + \hat{B}u + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \hat{C}\hat{z} \\ \hat{z} = [\hat{q}_1 \quad \hat{\dot{q}}_1 \quad \hat{x}_3]^T \\ L = [\beta \quad \beta_2 \quad \beta_3]^T = [\xi_1\omega_0 \quad \xi_2\omega_0 \quad \xi_3\omega_0]^T \end{cases} \quad (9)$$

式中 \hat{z} —— \bar{z} 的估计值 $\hat{q}_1, \hat{\dot{q}}_1, \hat{x}_3$ ——观测量

L ——观测器增益

ω_0 ——观测器带宽 \hat{y} ——系统输出

$\xi_i (i=1, 2, 3)$ 为 $\lambda(s) = s^3 + \xi_1s^2 + \xi_2s + \xi_3$ 特征根^[18], 满足

$$\xi_i = \frac{3!}{i!(3-i)!} \quad (i=1, 2, 3) \quad (10)$$

2.2 FNTSMC 设计

关节角 q_1 的跟踪误差为 $e_1 = q_{1r} - q_1$, 角速度跟踪误差为 $\dot{e}_1 = \dot{q}_{1r} - \dot{q}_1$ 。设计快速连续非奇异终端滑模面为

$$s_1 = e_1 + c_1 | \dot{e}_1 |^{\alpha_1} \tanh(\dot{e}_1) = e_1 + c_1 \text{sig}(\dot{e}_1)^{\alpha_1} = 0 \quad (11)$$

其中, q_{1r} 与 \dot{q}_{1r} 分别为关节角 q_1 的参考值及其一阶导数, $c_1 > 0, 1 < \alpha_1 < 2$ 为控制器参数。 $\tanh(\cdot)$ 为双曲正切函数, 可有效抑制控制力矩中的抖振现象。

对式(11)求关于时间的导数, 可得

$$\dot{s}_1 = \dot{e}_1 + c_1 \alpha_1 | \dot{e}_1 |^{\alpha_1 - 1} \ddot{e}_1 = 0 \quad (12)$$

将式(6)代入式(12)可得系统等效控制力矩为

$$\tau_{1_eq} = \bar{M}_1 [c_1^{-1} \alpha_1^{-1} \text{sig}(\dot{e}_1)^{2-\alpha_1} + \dot{q}_{1r} - \bar{M}_1^{-1} \hat{x}_3] \quad (13)$$

同时, 为了保证系统状态能在有限时间内收敛并抑制抖振, 选取快速终端滑模趋近律为

$$\dot{s}_1 = -k_{11}s_1 - k_{12} \text{sig}(s_1)^{p_1} \quad (0 < p_1 < 1) \quad (14)$$

式中 k_{11}, k_{12} ——控制器参数

进而, 可推导出基于趋近律的切换控制力矩为

$$\tau_{1_sw} = \bar{M}(k_{11}s_1 + k_{12} \text{sig}(s_1)^{p_1}) \quad (15)$$

联立式(14)、(15)可得关节角 q_1 的抗干扰控制器为

$$\tau_1 = \tau_{1_eq} + \tau_{1_sw} \quad (16)$$

同理, 设计关节角 q_2 的抗干扰控制器为

$$\tau_2 = \tau_{2_eq} + \tau_{2_sw} \quad (17)$$

3 稳定性分析

3.1 观测器收敛性证明

假设 1^[19]: 集总干扰 H 可导且有界, 则有

$$\|H\| < \infty, \|\dot{H}\| < \infty, \text{则其边界条件满足 } \sup_{t>b} \|H\| = H_b, \sup_{t>b} \|\dot{H}\| = h_b。$$

定义线性扩张状态观测器的估计误差为

$$\mathbf{e}_{\bar{z}} = \bar{z} - \hat{\bar{z}} \quad (18)$$

将式(9)代入到式(7)中,可得

$$\dot{\mathbf{e}}_{\bar{z}} = (\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{L}\bar{\mathbf{C}})\mathbf{e}_{\bar{z}} - \mathbf{E}\mathbf{h} = \mathbf{A}_e - \mathbf{E}\mathbf{h} \quad (19)$$

其中

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} -\zeta_1\omega_o & 1 & 0 \\ -\zeta_2\omega_o & 0 & 1 \\ -\zeta_3\omega_o & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(19)可知, \mathbf{A}_e 具有 3 个不同的特征根, 故必然存在一个正定矩阵 \mathbf{T} , 使得

$$\mathbf{A}_e = \mathbf{T}\text{diag}(-\lambda_1, -\lambda_2, -\lambda_3)\mathbf{T}^{-1} \quad (20)$$

将式(20)写成指数形式,有

$$e^{\mathbf{A}_e t} = \mathbf{T}\text{diag}(e^{-\lambda_1 t}, e^{-\lambda_2 t}, e^{-\lambda_3 t})\mathbf{T}^{-1} \quad (21)$$

当 $t > 0$ 时, 式(21)的 m_{∞} 范数满足

$$\|e^{\mathbf{A}_e t}\|_{m_{\infty}} \leq \Omega h_b e^{-\lambda_1 t} \quad (22)$$

式中 Ω ——权重函数

则式(19)中估计误差的解为

$$\mathbf{e}_{\bar{z}}(t) = e^{\mathbf{A}_e t} \mathbf{e}_{\bar{z}}(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}_e(t-\tau)} \mathbf{E}\mathbf{h}(\tau) d\tau \quad (23)$$

很明显, 根据假设 1, 观测器的估计误差稳定。进而, 根据 m_{∞} 范数的性质可得

$$\begin{aligned} \|\mathbf{e}_{\bar{z}}(t)\| &\leq \|e^{\mathbf{A}_e t}\| \|\mathbf{e}_{\bar{z}}(0)\| + \\ &\left\| \int_0^t e^{\mathbf{A}_e(t-\tau)} \mathbf{E}\mathbf{h}(\tau) d\tau \right\| \leq \|e^{\mathbf{A}_e t}\|_{m_{\infty}} \|\mathbf{e}_{\bar{z}}(0)\| + \\ &\int_0^t \|e^{\mathbf{A}_e(t-\tau)}\|_{m_{\infty}} \|\mathbf{E}\| \|\mathbf{h}(\tau)\| d\tau \leq \\ &\Omega h_b e^{-\lambda_1 t} \|\mathbf{e}_{\bar{z}}(0)\| + \int_0^t \Omega h_b e^{-\lambda_1(t-\tau)} d\tau \leq \\ &\Omega h_b e^{-\lambda_1 t} \|\mathbf{e}_{\bar{z}}(0)\| + \frac{\Omega h_b}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t}) \end{aligned} \quad (24)$$

其中, $\mathbf{e}_{\bar{z}}(0)$ 为初始条件。当 $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\lambda_1 t} = 0$ 时, 系统可在有限时间内收敛至某个区域, 即

$$\|\mathbf{e}_{\bar{z}}(t)\| \leq \frac{\Omega h_b}{\lambda_1} \quad (25)$$

3.2 滑模面收敛性证明

定理 1^[20]: 以关节 1 为例, 在式(16)的作用下, 二阶系统式(6)的关节角跟踪误差及关节角速度跟踪误差能在有限时间内收敛, 即

$$|e_1| \leq 2\Delta = 2\min(\Delta_1, \Delta_2) \quad (26)$$

$$|\dot{e}_1| \leq (\Delta/c_1)^{1/\alpha_1} \quad (27)$$

其中

$$\Delta_1 = |\hat{x}_3 - H_1|/k_{11}$$

$$\Delta_2 = (|\hat{x}_3 - H_1|/k_{12})^{1/p_1}$$

选择一个标准的李雅普诺夫函数

$$V_1 = \frac{1}{2} s_1^2 \quad (28)$$

对式(28)求关于时间的导数可得

$$\dot{V}_1 = s_1 \dot{s}_1 \quad (29)$$

根据式(11)~(16), 可得

$$\dot{V}_1 = c_1 \alpha_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1-1} (\hat{x}_3 - H_1) - \bar{k}_{11} s_1^2 - \bar{k}_{12} \text{sig}(s_1)^{p_1+1} \quad (30)$$

其中 $\bar{k}_{1i} = c_1 \alpha_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1-1} k_{1i}$ ($i=1, 2$)

式(30)具有 2 种形式, 即

$$\dot{V}_1 = -[\bar{k}_{11} - c_1 \alpha_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1-1} (\hat{x}_3 - H_1) s_1^{-1}] s_1^2 - \bar{k}_{12} |s_1|^{p_1+1} \quad (31)$$

$$\dot{V}_1 = -\bar{k}_{11} s_1^2 -$$

$$[\bar{k}_{12} - c_1 \alpha_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1-1} (\hat{x}_3 - H_1) \text{sig}(s_1)^{-p_1}] |s_1|^{p_1+1} \quad (32)$$

当式(31)满足 $\bar{k}_{11} - c_1 \alpha_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1-1} (\hat{x}_3 - H_1) s_1^{-1}$ 正定, 则有 $\dot{V}_1 < 0$; 同样地, 当式(32)满足 $\bar{k}_{12} - c_1 \alpha_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1-1} (\hat{x}_3 - H_1) \text{sig}(s_1)^{-p_1}$ 正定, 亦有 $\dot{V}_1 < 0$ 。

定理 2^[21]: 当李雅普诺夫函数 V_1 满足

$$\dot{V}_1 + \xi_1 V_1 + \rho_1 V_1^{\delta_1} \leq 0 \quad (33)$$

其中, $\xi_1 > 0, \rho_1 > 0$ 。此时, 稳定时间为

$$T_s \leq \xi_1^{-1} (1 - \delta_1)^{-1} \ln(1 + \xi_1 \rho_1^{-1} V_0^{1-\delta_1}) \quad (34)$$

其中 V_0 是 V_1 的初始条件。

结合定理 1、2, 可知快速连续非奇异终端滑模面(式(11))能在有限时间内收敛, 即

$$\begin{cases} \|s_1\| \leq |c_1 \alpha_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1-1} (\hat{x}_3 - H_1)| / \bar{k}_{11} = \\ |\hat{x}_3 - H_1| / \bar{k}_{11} = \Delta_1 \\ \|s_1\| \leq [|c_1 \alpha_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1-1} (\hat{x}_3 - H_1)| / \bar{k}_{12}]^{1/p_1} = \\ (|\hat{x}_3 - H_1| / \bar{k}_{12})^{1/p_1} = \Delta_2 \end{cases} \quad (35)$$

因此, 有 $\|s_1\| \leq \Delta = \min(\Delta_1, \Delta_2)$, 即滑模面有界且收敛。

3.3 跟踪误差收敛性证明

将式(11)改写成

$$e_1 + \left(c_1 - \frac{s_1}{\text{sig}(\dot{e}_1)^{\alpha_1}} \right) \text{sig}(\dot{e}_1)^{\alpha_1} = 0 \quad (36)$$

当 $\|s_1\| \leq \Delta$ 时, 关节角速度跟踪误差能在有限时间内收敛

$$|\dot{e}_1| \leq (\Delta/c_1)^{1/\alpha_1} \quad (37)$$

根据式(36)、(37)可得 $|e_1| \leq c_1 |\dot{e}_1|^{\alpha_1} + |s_1| \leq 2\Delta$, 故关节角跟踪误差也能在有限时间内收敛。

4 仿真算例

建立绳驱动空中机械臂的虚拟样机, 并导入 Simscape 环境中进行可视化仿真分析。为测试本文控制器的性能, 引入文献[22]提出的线性自抗扰控制 (Linear active disturbance rejection control, LADRC) 和文献[23]提出的 TSMC 与之比较。选择

2个关节角参考轨迹为方波信号, q_1 与 q_2 的初始条件分别为 0° 和 82.6° (在 Simscape 中测量而来), 其他条件为 0。同时添加均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声信号作为干扰力矩, 仿真时间持续 10 s。3种控制器参数如表 1 所示。

表 1 3种控制器参数

Tab. 1 Control parameters of three controllers

控制器	控制器参数
本文控制器	$c_1 = 0.05, c_2 = 0.05, k_{11} = 10, k_{12} = 400,$ $k_{21} = 40, k_{22} = 400, \omega_{o1} = 600, \omega_{o2} = 142$
LADRC	$\omega_{e1} = 30, \omega_{e2} = 88, \omega_{o1} = 346, \omega_{o2} = 110$
TSMC	$\lambda_1 = 30, \lambda_2 = 14, k_1 = 250, k_2 = 160, \varepsilon = 1.5$

3种控制下的关节角响应如图 3 所示, 可以明显看出本文控制器的响应速度、跟踪精度和鲁棒性优于 LADRC 和 TSMC。图 4 为 3种控制器的输出力矩响应, 可以看出由于本文控制器和 LADRC 结构中的 LESO 能有效估计出集总干扰, 故它们的控制力矩相对 TSMC 较为平坦, 同时本文控制力矩也没有明显的抖振现象。上述结果均表明了本文控制器具有较好的瞬态性能和稳态性能, 同时也验证了线性扩张状态观测器与快速连续非奇异终端滑模控制结合的合理性与有效性。

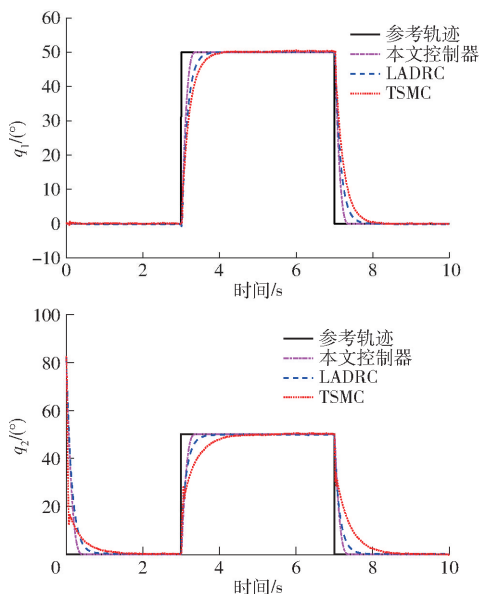


图 3 仿真中关节角位移响应曲线

Fig. 3 Response of joint position in simulation

图 5 给出了绳驱动空中机械臂在 Simscape 中的可视化运动过程, 从图中可以清晰地观察两个关节角的变化情况。在实际的水质采样中, 先操控旋翼飞行器飞至目标点附近悬停, 然后控制机械臂汲水作业。本文没有考虑飞行器的动力学特性, 而是将其与机械臂的耦合效应当作系统的外部扰动, 并用线性扩张状态观测器来补偿。

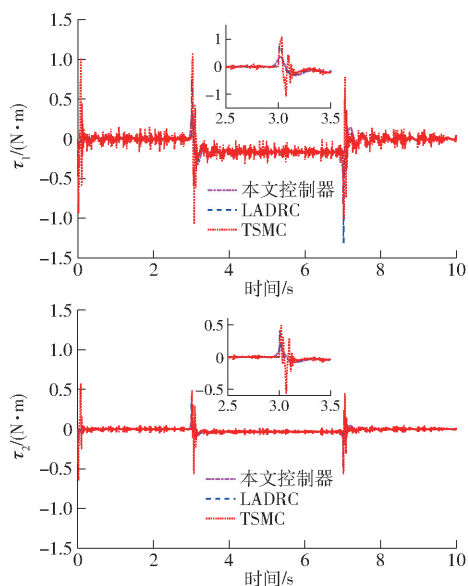


图 4 仿真中关节力矩响应曲线

Fig. 4 Response of joint torques in simulation

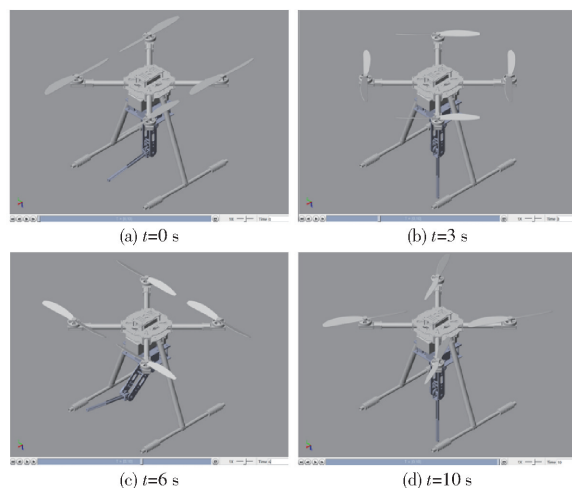


图 5 绳驱动空中机械臂的可视化运动

Fig. 5 Visual motion of cable-driven aerial manipulator

5 试验验证

搭建的绳驱动空中机械臂地面测试平台如图 6 所示。试验过程中, 在宿主机的 Simulink 环境中设计控制器, 编译后下载至目标机中, 目标机根据 PCI6225e 板卡采集关节位置信号, 再由与期望关节位置的误差计算出所需的控制力矩信号, 再将力矩信号经 PCI6225e 板卡传送到吊舱内的驱动电机, 实现关节空间的闭环控制。另外, 驱动电机选用 RoboMaster M2006 型直流减速电机, 额定转速为 500 r/min, 额定力矩为 1 N·m; 驱动器型号为 RoboMaster C610; 关节处安装的编码器型号为 AMT102-V, 测量精度为 0.044° 。引入 Cycloidal 曲线^[24]来设计 2 个关节的参考轨迹, q_1 的变化为 $0^\circ \sim 40^\circ$ (持续 5 s)、 $40^\circ \sim 0^\circ$ (持续 5 s)、 $0^\circ \sim 40^\circ$ (持续 5 s); q_2 的变化为 $0^\circ \sim 50^\circ$ (持续 5 s)、 $50^\circ \sim 0^\circ$ (持续

5 s)、 $0^\circ \sim 50^\circ$ (持续 5 s);汲水时间持续 5 s;总时间截取 20 s;采样频率为 1 000 Hz。

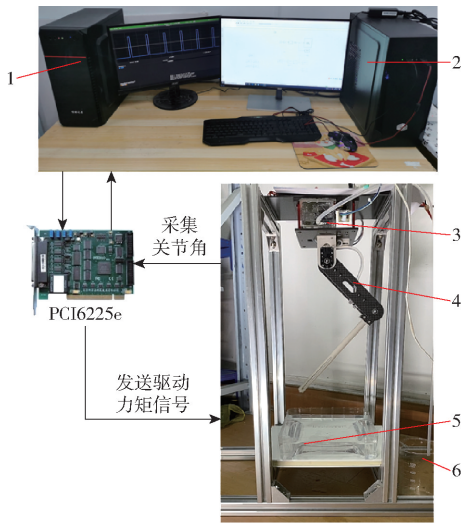


图 6 地面测试平台

Fig. 6 Ground test platform

1. 目标机 2. 宿主机 3. 吊舱 4. 绳驱动机械臂 5. 水源
6. 水样

将本文控制器与 LADRC、TSMC 作比较,结果如图 7~9 所示。从图 7 可以看出,在 3 种控制器的作用下, q_1 与 q_2 都能较好地跟踪参考轨迹,但很明显本文控制器的跟踪精度最高。图 8 给出了 3 种控制器下两关节角的跟踪误差,若以绝对最大误差 e_{\max} 和均方根误差 RMSE 作为评价指标^[25],则对于 q_1 ,本文控制器的 e_{\max} 分别比 LADRC 和 TSMC 减小了 20.06% 和 25.53%,RMSE 分别减小了 21.03% 和 35.07%;对于 q_2 ,本文控制器的 e_{\max} 分别比 LADRC 和 TSMC 减小了 14.24% 和 19.04%,RMSE 分别小了 59.87% 和 91.32%。最后,图 9 给出 3 种控制力矩的响应曲线,可以看出本文控制器相对平坦,尤其

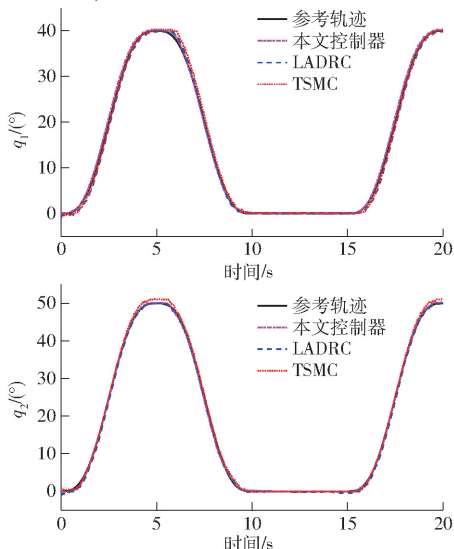


图 7 3 种控制器关节角响应曲线

Fig. 7 Joint response curves of three controllers

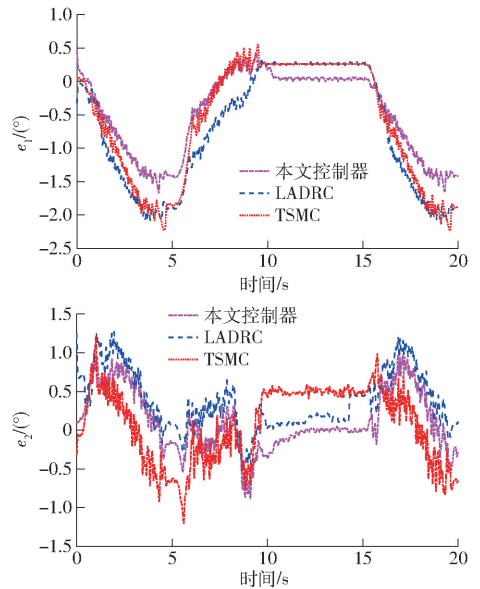


图 8 3 种控制器关节角跟踪误差曲线

Fig. 8 Joint tracking errors curves of three controllers

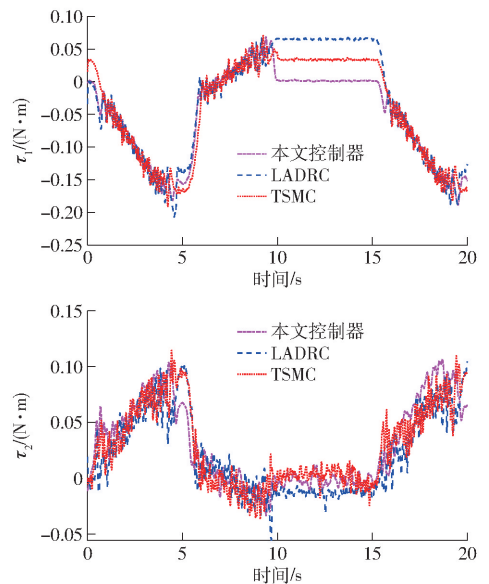


图 9 3 种控制器输出力矩曲线

Fig. 9 Comparison of joint torques curves of three controllers

是在 10~15 s 汲水期间最为平稳;以 q_2 为例,当关节角误差约为 1° 时(8~10 s),本文控制器的边界层厚度增大,使得状态量能以更快的趋近速度收敛至滑模面,同时有效削弱抖动现象,而此阶段其他两种控制器的输出力矩抖动较大,LADRC 的控制力矩还发生了激变($-0.052 \text{ N}\cdot\text{m}$),只能靠激增力矩将系统状态量拉回至目标值。因此,本文控制器的性能优于 LADRC 和 TSMC。

6 结论

(1) 设计了水质采样绳驱动空中机械臂机械结构,并将绳驱动的柔性效应等效到关节处,建立了绳驱动空中机械臂的动力学模型。仿真结果也证明了

模型的有效性。

(2) 可视化仿真展示了绳驱动空中机械臂的运动过程, 表明了本文控制器比 LADRC 和 TSMC 具有更好的瞬态性能和稳态性能。

(3) 地面汲水试验结果表明本文控制器的 e_{\max} 和 RMSE 指标都小于 LADRC 和 TSMC, 具有较高的跟踪精度、较快的响应速度和较强抗干扰能力, 也能较好地削弱控制抖振。

参 考 文 献

- [1] BOFILL-MAS S, RUSIÑOL M. Recent trends on methods for the concentration of viruses from water samples [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2020, 16(13): 7–13.
- [2] XILUN D, PIN G U O, KUN X U, et al. A review of aerial manipulation of small-scale rotorcraft unmanned robotic systems [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(1): 200–214.
- [3] MENG X, HE Y, HAN J. Survey on aerial manipulator: system, modeling, and control [J]. *Robotica*, 2020, 38(7): 1288–1317.
- [4] 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 [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(10): 1860–1870.
- [5] IMANBERDIYEV N, KAYACAN E. A fast learning control strategy for unmanned aerial manipulators [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 94(3): 805–824.
- [6] 张广玉, 何玉庆, 代波, 等. 面向抓取作业的飞行机械臂系统及其控制 [J]. *机器人*, 2019, 41(1): 19–29.
ZHANG Guangyu, HE Yuqing, DAI Bo, et al. Towards grasping task: system and control of an aerial manipulator [J]. *Robot*, 2019, 41(1): 19–29. (in Chinese)
- [7] KIM S, CHOI S, KIM H J. Aerial manipulation using a quadrotor with a two DOF robotic arm [C] // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 4990–4995.
- [8] MA Z, SUN G. Dual terminal sliding mode control design for rigid robotic manipulator [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2018, 355(18): 9127–9149.
- [9] YI S, ZHAI J. Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators [J]. *ISA Transactions*, 2019, 90: 41–51.
- [10] WANG Y, CHEN J, YAN F, et al. Adaptive super-twisting fractional-order nonsingular terminal sliding mode control of cable-driven manipulators [J]. *ISA Transactions*, 2019, 86: 163–180.
- [11] 康升征, 吴洪涛, 杨小龙, 等. 压电微定位系统自适应鲁棒有限时间跟踪控制 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 403–410.
KANG Shengzheng, WU Hongtao, YANG Xiaolong, et al. Adaptive robust finite-time tracking control for piezoelectric micropositioning systems [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 403–410. (in Chinese)
- [12] MÜLLER D, VEIL C, SAWODNY O. Disturbance observer based control for quasi continuum manipulators [J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2020, 53(2): 9808–9813.
- [13] 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.
- [14] WANG Y, MA Y, CAI Z, et al. Quadrotor trajectory tracking and obstacle avoidance by chaotic grey wolf optimization-based backstepping control with sliding mode extended state observer [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2020, 42(9): 1675–1689.
- [15] DENG W, YAO J. Extended-state-observer-based adaptive control of electrohydraulic servomechanisms without velocity measurement [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 25(3): 1151–1161.
- [16] ZHANG J, FENG J, ZHOU Y, et al. Linear active disturbance rejection control of waste heat recovery systems with organic Rankine cycles [J]. *Energies*, 2012, 5(12): 5111–5125.
- [17] ZHAO J, WANG Y, WANG D, et al. Practical continuous nonsingular terminal sliding mode control of a cable-driven manipulator developed for aerial robots [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2020, 234(9): 1011–1023.
- [18] GAO J, ZHUANG Y, XIAO J, et al. Attitude tracking control of a quadrotor based on linear active disturbance rejective control [C] // 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER) IEEE, 2015: 287–292.
- [19] AHI B, HAERI M. Linear active disturbance rejection control from the practical aspects [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6): 2909–2919.
- [20] NEKOUKAR V, ERFANIAN A. Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, 179(1): 34–49.
- [21] WANG Y, ZHU K, CHEN B, et al. Model-free continuous nonsingular fast terminal sliding mode control for cable-driven manipulators [J]. *ISA Transactions*, 2020, 98: 483–495.
- [22] 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.
- [23] TANG Y. Terminal sliding mode control for rigid robots [J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 51–56.
- [24] SHAH S V, SAHA S K, DUTT J K. Dynamics of tree-type robotic systems [M]. Springer, Dordrecht, 2013: 73–88.
- [25] DING L, LI Y. Optimal attitude tracking control for an unmanned aerial quadrotor under lumped disturbances [J]. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2020, 12: 1–14.