

## 【航空电子电气工程】

## 柔性关节航空航天机械臂抗干扰控制研究

郇新<sup>1,2</sup>, 李珺<sup>1</sup>, 魏明鉴<sup>1</sup>, 王鑫洋<sup>1</sup>

(1. 潍坊工程职业学院 机电工程学院, 山东 潍坊 262500;

2. 吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130061)

**摘要:** 航空航天机械臂具有柔性且对精度要求高, 为抑制空间环境力矩和内部参数变化等干扰, 提出了一种基于干扰观测器的航空航天机械臂反步控制策略。首先, 建立柔性关节航空航天机械臂受干扰时的单关节数学模型, 基于数学模型设计柔性关节航空航天机械臂的非线性干扰观测器, 保证其能稳定估计干扰信号; 然后, 基于 Lyapunov 函数设计反步控制器, 将干扰观测器估计到的干扰估计值补偿到反步控制器端, 产生抑制实际干扰的控制量; 最后, 利用 MATLAB/simulink 搭建虚拟仿真进行验证。仿真结果表明, 基于干扰观测器的柔性关节航空航天机械臂反步控制器能够有效抑制干扰, 极大地改善了柔性关节航空航天机械臂的抗干扰性能。

**关键词:** 干扰观测器; 柔性关节航空航天机械臂; 抗干扰; 反步控制

**中图分类号:** V 44; TP 241 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.issn.2097-4973.2024.01.009

机械臂因具有精度高、负载大、可长时间稳定工作的优点已被广泛应用在航空航天、汽车制造业等重要领域<sup>[1-2]</sup>。自动化技术的发展, 对具有欠驱动特点的柔性关节航空航天机械臂提出了更高要求<sup>[3-4]</sup>。柔性关节航空航天机械臂的位置控制已有众多研究成果。文献[5]通过模糊控制实时调节控制器参数, 以实现对时变转动惯量、负载参数、柔性造成的输出转速的补偿; 奇异摄动控制法可对系统进行快、慢变子系统分解, 降低了高阶系统控制器的设计难度<sup>[6-7]</sup>; 文献[8]利用加速度传感器反馈控制, 实现了力控制, 从自由运动状态到接触力控制的接触过程中的平滑稳定控制, 从而克服了单独利用速度反馈控制带来的局限性; 滑模控制方法鲁棒性强, 但滑模控制无法消除抖振, 造成力矩波动过大<sup>[9]</sup>; 文献[10]考虑了时变扰动环境下, 柔性机械臂系统的有限时间跟踪控制问题, 通过构造动态终端滑模面, 设计了连续的有限时间跟踪控制算法。在已有研究中都能够实现柔性关节航空航天机械臂的稳定控制, 但在干扰环境下柔性关节航空航天机械臂的控制研究较少, 需要进一步研究。考虑到空间环境力矩的干扰以及柔性关节航空航天机械臂内部参数的变化对控制精度的影响, 本文提出了一种基于干扰观测器的柔性关节航空航天机械臂反步控制策略。本策略根据运动关系按照四阶的系统进行推导得到控制输入, 相比单独推导两个二阶的运动系统要简略, 妥善处理了“微分爆炸”。本策略的另一个优势为干扰观测器对外界干扰的估计是通过观测柔性航空航天机械臂的内状态完成的, 可以解决高速高空未知干扰不易确定的问题, 摆脱了传感器的限制。具体思路为, 实时观测系统内部状态变量从而估计干扰, 将干扰的估计值反馈给控制器, 产生与实际干扰抵消的补偿量, 实现柔性关节航空航天机械臂末端最终的稳定。该研究提出了柔性关节航空航天机

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MF262)

第一作者简介: 郇新(1981—), 男, 山东青州人, 副教授, 硕士, 主要从事工业机器人、自动控制研究。

E-mail: 65700973@qq.com

械臂应对干扰稳定控制的新思路,为进一步提高柔性关节航空航天机械臂性能的研究提供了理论参考。

### 1 柔性关节航空航天机械臂受干扰数学模型

基于文献[11],柔性关节航空航天机械臂的单关节数学模型可描述为

$$\begin{cases} I\ddot{q} + F\dot{q} + K(q - q_m) + Mgl\sin q = 0, \\ J\ddot{q}_m + B\dot{q}_m - K(q - q_m) = u. \end{cases}$$

考虑柔性关节航空航天机械臂的转子受到干扰,得到柔性关节航空航天机械臂受到干扰时的数学模型

$$\begin{cases} \ddot{q} = -\frac{1}{I}[F\dot{q} + K(q - q_m) + Mgl\sin q], \\ \ddot{q}_m = \frac{1}{J}[u + K(q - q_m) - B\dot{q}_m] + \frac{1}{J}d. \end{cases}$$

式中: $q, q_m$ 分别为连杆和转子的角位置; $I, J$ 分别为连杆和转子的转动惯量; $K$ 为关节刚度系数; $M, g, l$ 分别为连杆质量、重力加速度和连杆重心至关节长度; $u$ 为电机转矩输入; $d$ 为不确定干扰,包含空间环境力矩的干扰以及柔性关节航空航天机械臂内部参数的变化。

### 2 柔性关节航空航天机械臂非线性干扰观测器设计

非线性干扰观测器设计的具体模型为

$$\begin{cases} \dot{h} = -nh - n(p(q) + v + bu), \\ \hat{d} = h + p(q), \end{cases} \quad v = \frac{1}{J}[K(q - q_m) - B\dot{q}_m], b = \frac{1}{J}.$$

式中:未知量  $p(q), \hat{d}, h$  分别为待设计的非线性向量函数、实际干扰  $d$  的估计值、非线性干扰观测器的内状态。定义  $n$  为观测估计的增益,则  $n = \frac{\partial p(q)}{\partial q}$ 。定义实际值与干扰估计值误差为  $\tilde{d} = d - \hat{d}$ 。

假设干扰可观测且有界,在  $\dot{\tilde{d}} \approx 0$  的条件下,即干扰随时间变化缓慢,此假设可以描述实际过程中的大部分干扰,具有一般性<sup>[12]</sup>。因此干扰观测器估计的误差方程为  $\dot{\tilde{d}} + \frac{\partial p(q)}{\partial q}\tilde{d} = 0$ ,其中  $\dot{\tilde{d}} + n\tilde{d} = 0$ 。为保证干扰观测器估计的干扰与实际干扰一致,则要求  $\tilde{d}(t) = \tilde{d}(0)\tilde{d}^{-n}$ 。此时,微分方程的解指数收敛,干扰观测器已能够稳定估计干扰,当  $\tilde{d} = 0$  时,  $d = \hat{d}$ 。

### 3 柔性关节航空航天机械臂抗干扰反步控制器设计

柔性关节航空航天机械臂抗干扰控制原理框图如图 1 所示。

第 1 步 定义连杆  $q$  运动时角位置的误差变量  $e_1 = q_d - q$ ,取  $e_1$  导数,得  $\dot{e}_1 = \dot{q}_d - \dot{q} = e_2 + a_1$ 。式中, $a_1$ 为虚拟控制量, $e_2 = \dot{q} - a_1$ 为虚拟误差变量。Lyapunov 函数构造为  $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$ ,取其导数,得  $\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = e_1(e_2 + a_1)$ ,仅当  $\dot{V}_1 < 0$

时,连杆  $q$  运动时角位置的误差才稳定收敛,有虚拟控制量为  $a_1 = -c_1e_1$ 。式中, $c_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为控制增益且全部大于 0,  $\dot{V}_1 = -c_1e_1^2 + e_1e_2, e_2 = c_1(q_d - q) + \dot{q}_d - \dot{q}$ 。

第 2 步 对虚拟误差变量  $e_2$  取导,得

$$\dot{e}_2 = \frac{1}{I}[F\dot{q} + K(q - q_m) + Mgl\sin q] + c_1(\dot{q}_d - \dot{q}) + \ddot{q}_d = e_3 + a_2.$$

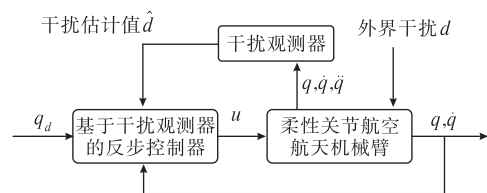


图 1 原理框图

Lyapunov 函数构造为  $V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2$ 。取导数得  $\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2\dot{e}_2 = -c_1e_1^2 + e_1e_2 + e_2(e_3 + a_2)$ , 仅当  $\dot{V}_2 < 0$  时, 连杆  $q$  运动时角速度的误差才稳定收敛, 有虚拟控制量为  $a_2 = -c_2e_2 - e_1$ 。此时,  $\dot{V}_2 = -c_1e_1^2 - c_2e_2^2 + e_2e_3$ 。于是  $e_3 = (1 + c_1c_2)(q_d - q) + (c_1 + c_2)(\dot{q}_d - \dot{q}) + \ddot{q}_d + \frac{1}{I}[F\dot{q} + K(q - q_m) + Mgl\sin q]$ 。

第 3 步 对虚拟误差变量  $e_3$  取导, 得

$$\dot{e}_3 = (1 + c_1c_2)(\dot{q}_d - \dot{q}) + (c_1 + c_2)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + \ddot{q}_d + \frac{1}{I}[F\ddot{q} + K(\dot{q} - \dot{q}_m) + Mgl\dot{q}\cos q] = e_4 + a_3。$$

Lyapunov 构造函数为  $V_3 = V_2 + \frac{1}{2}e_3^2$ , 取其导数, 得  $\dot{V}_3 = -c_1e_1^2 - c_2e_2^2 + e_2e_3 + e_3\dot{e}_3$ , 仅当  $\dot{V}_3 < 0$  时, 转子  $q_m$  转动时角位置的误差才稳定收敛, 有虚拟控制量为  $a_3 = -c_3e_3 - e_2$ ,  $\dot{V}_3 = -c_1e_1^2 - c_2e_2^2 - c_3e_3^2 + e_3e_4$ 。于是  $e_4 = (c_1 + c_3 + c_1c_2c_3)(q_d - q) + (2 + c_1c_2 + c_1c_3 + c_2c_3)(\dot{q}_d - \dot{q}) + (c_1 + c_2)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + c_3\ddot{q}_d + \ddot{q}_d + \frac{1}{I}[F\ddot{q} + K(\dot{q} - \dot{q}_m) + Mgl\dot{q}\cos q] + \frac{c_3}{I}[F\dot{q} + K(q - q_m) + Mgl\sin q]$ 。

第 4 步 Lyapunov 函数构造为  $V_4 = V_3 + \frac{1}{2}e_4^2$ , 取其导数, 得  $\dot{V}_4 = -c_1e_1^2 - c_2e_2^2 - c_3e_3^2 + e_3e_4 + e_4\dot{e}_4$ 。为保证设计的柔性关节航空航天机械臂系统稳定收敛, 即  $\dot{V}_4 < 0$ ,  $e_4$  须满足关系式  $\dot{e}_4 = -c_4e_4 - e_3$ 。忽略  $\dot{q}_d, \ddot{q}_d$ , 整理得到

$$\begin{aligned} \frac{K}{IJ}u &= (1 + c_1c_2 + c_1c_4 + c_3c_4 + c_1c_2c_3c_4)(q_d - q) + \\ & (2c_1 + c_2 + c_3 + 2c_4 + c_1c_2c_3 + c_1c_2c_4 + c_1c_3c_4 + c_2c_3c_4)(\dot{q}_d - \dot{q}) + \\ & (2 + c_1c_2 + c_1c_3 + c_2c_3 + c_1c_4 + c_2c_4)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + (c_1 + c_2)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + \\ & \frac{Mgl}{I}[(1 + c_3c_4)\sin q + (c_3 + c_4)\dot{q}\cos q + \ddot{q}\cos q - \dot{q}^2\sin q] + (1 + c_3c_4)F\dot{q} + (c_3 + c_4)F\ddot{q} + \\ & \frac{K}{I}[(c_3 + c_4)(\dot{q} - \dot{q}_m) + (1 + c_3c_4) + (\frac{1}{I} + \frac{1}{J})](q - q_m) + \frac{K}{I^2}(Mgl\sin q + F\dot{q}) - \frac{KB}{IJ}\dot{q}_m - \frac{K}{IJ}d。 \end{aligned}$$

得到

$$\begin{aligned} u &= \frac{IJ}{K}\{(1 + c_1c_2 + c_1c_4 + c_3c_4 + c_1c_2c_3c_4)(q_d - q) + \\ & (2c_1 + c_2 + c_3 + 2c_4 + c_1c_2c_3 + c_1c_2c_4 + c_1c_3c_4 + c_2c_3c_4)(\dot{q}_d - \dot{q}) + \\ & (2 + c_1c_2 + c_1c_3 + c_2c_3 + c_1c_4 + c_2c_4)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + (c_1 + c_2)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + \\ & \frac{Mgl}{I}[(1 + c_3c_4)\sin q + (c_3 + c_4)\dot{q}\cos q + \ddot{q}\cos q - \dot{q}^2\sin q] + (1 + c_3c_4)F\dot{q} + (c_3 + c_4)F\ddot{q} + \\ & \frac{K}{I}[(c_3 + c_4)(\dot{q} - \dot{q}_m) + (1 + c_3c_4) + (\frac{1}{I} + \frac{1}{J})](q - q_m) + \frac{K}{I^2}(Mgl\sin q + F\dot{q}) - \frac{KB}{IJ}\dot{q}_m\} - d。 \end{aligned}$$

由  $d = \hat{d}$  得到控制输入

$$\begin{aligned} u &= \frac{IJ}{K}\{(1 + c_1c_2 + c_1c_4 + c_3c_4 + c_1c_2c_3c_4)(q_d - q) + \\ & (2c_1 + c_2 + c_3 + 2c_4 + c_1c_2c_3 + c_1c_2c_4 + c_1c_3c_4 + c_2c_3c_4)(\dot{q}_d - \dot{q}) + \\ & (2 + c_1c_2 + c_1c_3 + c_2c_3 + c_1c_4 + c_2c_4)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + (c_1 + c_2)(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + \\ & \frac{Mgl}{I}[(1 + c_3c_4)\sin q + (c_3 + c_4)\dot{q}\cos q + \ddot{q}\cos q - \dot{q}^2\sin q] + (1 + c_3c_4)F\dot{q} + (c_3 + c_4)F\ddot{q} + \\ & \frac{K}{I}[(c_3 + c_4)(\dot{q} - \dot{q}_m) + (1 + c_3c_4) + (\frac{1}{I} + \frac{1}{J})](q - q_m) + \frac{K}{I^2}(Mgl\sin q + F\dot{q}) - \frac{KB}{IJ}\dot{q}_m\} - \hat{d}。 \end{aligned}$$

由此, 基于 Lyapunov 函数得到了柔性关节航空航天机械臂的反步控制器。下面将对基于干扰观测器的

柔性关节航空航天机械臂反步控制的稳定性进行分析。

#### 4 基于干扰观测器的柔性关节航空航天机械臂反步控制稳定性分析

将干扰观测器误差方程和状态误差方程联立得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \\ \dot{e}_4 \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -c_2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -c_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ d \end{bmatrix},$$

选择控制器参数  $c_1, c_2, c_3, c_4$  和观测器参数  $n$  的值,使系统矩阵

$$\begin{bmatrix} -c_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -c_2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -c_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -n \end{bmatrix}$$

对任意  $x \in R^5$  是 Hurwitz 的,即所有特征根都在虚轴左半开平面,则状态跟踪误差  $e_1, e_2, e_3, e_4$  有限时间内收敛为 0。因此,基于干扰观测器的柔性关节航空航天机械臂的控制是稳定的。

#### 5 仿真与比较

为验证控制器的有效性,搭建 MATLAB/simulink 平台进行仿真,仿真具体参数参考文献[13]中柔性关节航空航天机械臂的参数。单关节柔性关节航空航天机械臂参数设置为  $M=1 \text{ kg}, J=0.00379 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, l=1 \text{ m}, I=4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, K=1000 \text{ N/rad}, g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。设定柔性关节航空航天机械臂连杆初始角位置为  $0 \text{ rad}$ ,转子的初始角位置为  $0 \text{ rad}$ ,连杆目标角位置为  $1 \text{ rad}$ 。控制器可调增益参数设定为  $c_1=c_2=c_3=c_4=80, n=6$ 。

##### 5.1 柔性关节航空航天机械臂在受到连续干扰时的控制效果

经仿真模拟,柔性关节航空航天机械臂受到的干扰值与干扰观测器估计值如图 2 所示。图 2 中虚线表示原始干扰值,实线表示干扰观测器估计到的实时干扰值。可以看出,柔性关节航空航天机械臂在受到连续正弦干扰时,干扰观测器能够稳定估计干扰,估计值准确,而且有效。

在受到连续正弦信号干扰时,柔性关节航空航天机械臂响应曲线如图 3 和图 4 所示。图 3、图 4 中虚线分别表示仅有反步控制器时的连杆和转子的实时角位置,实线分别表示存在基于干扰观测器补偿的反步控制器控制时的连杆和转子实时角位置。

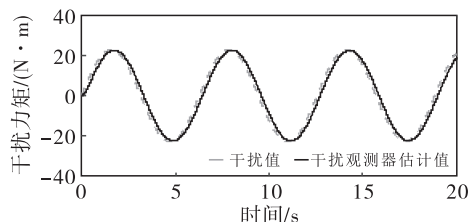


图 2 连续干扰值与干扰观测器估计值

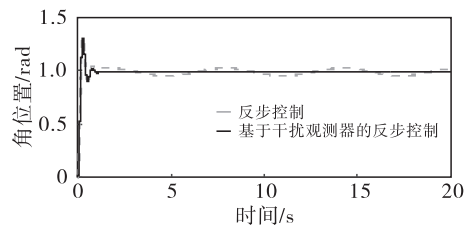


图 3 受连续杆干扰时的连杆响应曲线

由图 3、图 4 可以看出,在所受干扰相同的情况下,反步控制器控制时,连杆角位置和转子角位置都大幅度地偏离了目标位置;存在基于干扰观测器补偿的反步控制器控制时,第 1 s 迅速响应,连杆和转子都没有波动,且基本处于稳定状态。

## 5.2 柔性关节航空航天机械臂在受到阶跃干扰时的控制效果

图5为干扰与干扰观测器估计值的仿真比较,图中虚线表示原始干扰值,实线表示干扰观测器估计到的实时干扰值。

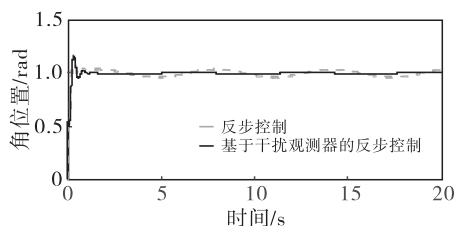


图4 受连续杆干扰时的转子响应曲线

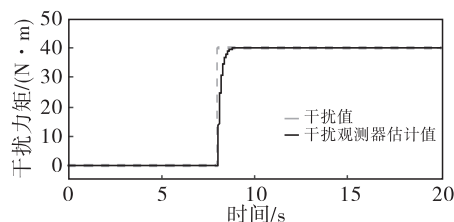


图5 阶跃干扰值与干扰观测器估计值

在受到瞬时阶跃信号干扰时,柔性关节航空航天机械臂响应曲线如图6和图7所示。图6、图7中虚线分别表示仅有反步控制器时的连杆和转子的实时角位置,实线分别表示存在基于干扰观测器补偿的反步控制器控制时的连杆和转子实时角位置。可以看出,在所受干扰相同的情况下,反步控制器控制时,连杆角位置和转子角位置受干扰的影响较大,都出现了持续的约0.1 rad误差;基于干扰观测器补偿的反步控制器控制时,较稳定地处在目标位置,只在阶跃瞬间,角位置有较小幅度的变化。

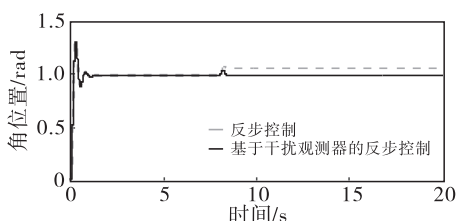


图6 受阶跃干扰时的连杆响应曲线

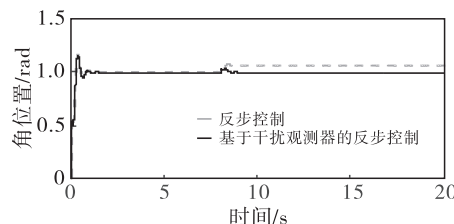


图7 受阶跃干扰时的转子响应曲线

## 6 结束语

柔性关节航空航天机械臂的高精度决定了其必须具有高可靠性,这对控制柔性关节航空航天机械臂的算法提出了更高的要求。本文考虑到在实际环境中干扰对柔性关节航空航天机械臂的影响,于是设计了干扰观测器对外界干扰实时估计,将干扰的估计值反馈给控制器产生抑制干扰的补偿量,得到了基于干扰观测器的柔性关节航空航天机械臂控制器,实现了系统的抗干扰。MATLAB/simulink 仿真结果表明,基于干扰观测器的航空航天机械臂反步控制器,对连续正弦信号干扰或瞬时阶跃信号干扰是有效的,具有较强的抗干扰能力,为工程应用和理论研究提供了新的借鉴。

## 参考文献:

- [1] 孙巍伟,代锬,马飞. 空间柔性机械臂建模、控制以及轨迹规划研究综述[J]. 科学技术与工程,2024,24(1):34-60.
- [2] 李珺,李艳芳,王成华,等. 基于干扰观测器的倒立摆抗干扰反步控制研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2023,38(4):94-100.
- [3] 黎凯,张尧,陈余军. 柔性空间机械臂在轨操作仿真与分析[J]. 空间控制技术与应用,2018(5):60-69.
- [4] 浦玉学,陈演,李孝宝. 柔性关节空间机械臂传感容错无模型自适应控制[J]. 宇航学报,2024(1):133-141.
- [5] LI D, CHEN H. Feedback control for n-link flexible joint robots with online gravity compensation [C]// 中国自动化学会控制理论专业委员会,中国自动化学会,中国系统工程学会. 第42届中国控制会议论文集(8). 天津,2023.
- [6] 刘福才,李倩,刘林. 柔性关节空间机械臂奇异摄动自抗扰控制仿真研究[J]. 高技术通讯,2016,26

(6):567-576.

- [7] 鹿爱民,王振,马双宝. 柔性机械臂自适应神经网络反演控制[J]. 机械设计与制造,2024(6):309-314.
- [8] QIU B,GAO S,ZHANG W. Observer-based robust fault diagnosis scheme for actuators in flexible joint robot manipulators[C]//东北大学,中国自动化学会信息物理系统控制与决策专业委员. 第 34 届中国控制与决策会议论文集(3). 合肥,2022.
- [9] 吴梦洋,杨吉康,于晋伟. 区域约束环境下柔性关节机械臂的一致性控制[J]. 系统科学与数学,2024, 44(1):60-70.
- [10] YANG W,DU G,GUO X, et al. Adaptive neural networks control of flexible-joint robots with full-state constraint;dynamic nonlinear mapping technique[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会,中国自动化学会,中国系统工程学会. 第 41 届中国控制会议论文集(2). 合肥,2022.
- [11] 王冬冬. 柔性关节机械臂系统的自适应反步控制研究[D]. 青岛:青岛大学,2022.
- [12] 卢昊,王娜,乔建忠,等. 基于非线性干扰观测器的导弹系统指令滤波反步控制[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会,中国系统工程学会. 第三十二届中国控制会议论文集(C卷). 西安,2013.
- [13] 王博. PMSM 驱动的柔性关节机器人有限时间命令滤波反步控制[D]. 青岛:青岛大学,2021.

## Research on Anti-disturbance Control for Flexible Joints Aerospace Robotic Arms

HUAN Xin<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, WEI Mingjian<sup>1</sup>, WANG Xinyang<sup>1</sup>

(1. *Department of Mechanical and Electrical Engineering,*

*Weifang Engineering Vocational College, Weifang 262500, China;*

*2. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)*

**Abstract:** In response to the flexibility and high precision requirements of aerospace robotic arms, a disturbance observer-based backstepping control strategy for aerospace robotic arms is proposed to suppress disturbances such as space environmental torque and internal parameters variation. This strategy can accurately, stably, and smoothly track command signals in different scenarios. Firstly, establish the single joint mathematical model of the flexible joints aerospace robotic arm to the mode under disturbance, design a nonlinear disturbance observer for aerospace robotic arm based on mathematical models, and ensure that it can stably estimate interference signals. Then, design a backstepping controller based on the Lyapunov function, compensate the estimated disturbance value by the disturbance observer to the backstepping controller, and generate control quantities to suppress actual disturbance. Finally, use MATLAB/Simulink to build a virtual simulation for verification. The simulation results show that the backstepping controller of a flexible joint aerospace robotic arm based on disturbance observer can effectively suppress disturbance, and greatly improve the anti-disturbance performance of flexible joint aerospace robotic arm.

**Keywords:** disturbance observer; flexible joints aerospace robotic arm; anti-disturbance; backstepping control

(责任编辑:王新亮)

**引用格式** 郇新,李珺,魏明鉴,等. 柔性关节航空航天机械臂抗干扰控制研究[J]. 山东航空学院学报,2024,41(1):73-78.  
HUAN X, LI J, WEI M J, et al. Research on anti-disturbance control for flexible joints aerospace robotic arms [J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2024, 41(1): 73-78.