

# 基于低通滤波器的柔性关节空间机器人时延估计跟踪控制

徐河振<sup>1</sup>, 于潇雁<sup>1,2\*</sup>, 张宇涵<sup>1</sup>, 陈力<sup>1</sup>

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 福州大学 流体动力与电液智能控制福建省高校重点实验室, 福建 福州 350116)

**摘要:**为解决位姿不受控情况下柔性关节空间机器人系统预抓取阶段的关节跟踪控制和振动问题,采用拉格朗日方程并结合动量守恒原理进而建立漂浮基三杆柔性关节空间机器人系统动力学方程。为提高柔性关节的等效刚度,引入关节柔性补偿的方法;即根据奇异摄动理论,将柔性关节空间机器人系统分解为慢变系统和快变系统。在此基础上,针对慢变系统设计以时延估计为主框架的滑模控制方法,同时与低通滤波器相结合消除滑模控制带来的系统抖动问题;针对快变系统设计线性速度差值反馈控制系统,抑制柔性关节给系统带来的柔性振动问题。通过仿真验证空间机械臂能够在有限时间内快速、稳定地跟踪上期望轨迹,证实该控制方案具有较好的鲁棒性和可靠性。

**关键词:**柔性关节空间机器人;关节柔性补偿;时延估计;滑模变结构控制;低通滤波器

**中图分类号:**TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2024)04-142-08

## Time-delay estimation tracking control of flexible-joint space robot based on low-pass filter

XU Hezhen<sup>1</sup>, YU Xiaoyan<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Yuhan<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>

(1. School of Machine Engineer and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Key Laboratory of Fluid Power and Intelligent Electro-Hydraulic Control, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** In order to solve the joint tracking control and vibration problem of flexible-joint space robot system in the pre-grasping stage when the position and pose are not controlled, the dynamic equations of a free-floating three-bar flexible-joint space robot system are established using the Lagrangian equation in conjunction with the principle of momentum conservation. In order to improve the equivalent stiffness of flexible-joint, a joint flexible compensation method was introduced. The flexible-joint space robot system was divided into slow and fast systems by singular perturbation theory. On this basis, a sliding mode control method with time delay estimation as the main framework was designed for the slow variable systems, while combining it with a low-pass filter to eliminate the system chattering problem caused by sliding mode control. A linear velocity difference feedback control system was designed for the fast-changing system to suppress the flexible vibration problems introduced by the flexible joints. Simulation verification demonstrates that the space robotic arm is capable of quickly and steadily tracking the desired trajectory within a limited time, confirming that the control scheme possesses good robustness and reliability.

**Keywords:** flexible-joint space robot; joint flexibility compensation; time-delay estimation; sliding mode variable structure control; low-pass filter

随着空间技术的快速革新,空间资源的开发逐渐成为军事战略的重要目标之一,同时引起了国内外诸多学者的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。航天器在轨服

务任务逐渐增多,在空间机器人系统领域的研究逐渐频繁,主要包括航天器维护、舱外监视和检测、卫星捕获、辅助航天员出舱活动等空间任

收稿日期:2022-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11372073,51741502);福建省自然科学基金资助项目(2020J01450);福建省工业机器人基础部件技术重大研发平台资助项目(2014H21010011)

第一作者:徐河振(1995—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,E-mail:1599510480@qq.com

\*通信作者:于潇雁(1974—),女,山东烟台人,教授,博士,硕士生导师,E-mail:cool@fzu.edu.cn

引用格式:徐河振,于潇雁,张宇涵,等.基于低通滤波器的柔性关节空间机器人时延估计跟踪控制[J].国防科技大学学报,2024,46(4):142-149.

**Citation:** XU H Z, YU X Y, ZHANG Y H, et al. Time-delay estimation tracking control of flexible-joint space robot based on low-pass filter[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(4): 142-149.

务<sup>[6-8]</sup>。机器人系统的设计要求往往具有高精度、高负载、强鲁棒性、轻质且臂长等特点,继续纯刚度的空间机器人假设,已经达不到在轨任务的要求,这使得空间机器人系统不可避免地具有柔性,但是柔性关节机械臂系统是一种复杂的动力学模型,载体与机械臂杆之间存在动力学强耦合性、参数不确定、非线性以及机械臂系统关节存在柔性振动等,均会对机械臂系统的稳定性和控制精度造成较大的影响。建立相应的系统动力学模型以有效抑制柔性关节振动,设计先进的控制器以削弱不确定因素的影响,是现在亟待解决的问题<sup>[9-12]</sup>。

柔性关节空间机器人系统在空间在轨操作任务中更易触发柔性振动效应,为了系统的稳态平衡,学者们提出了各种先进的控制策略。Jin等<sup>[13]</sup>针对柔性关节机器人的控制问题,提出了一种鲁棒自适应控制器,采用时延估计方法消除非线性项及扰动力矩项,利用滑动变量和本身的增益动态更新控制器的增益,提供了稳定的控制作用。Shang等<sup>[14]</sup>针对并联机器人系统提出了一种新的自适应协调控制方法并在不确定运动学和非线性动力学下进行高性能控制,该控制方法控制性能良好,控制精度高且反应快,但此方案需要详细的系统动力学参数和复杂系统项的估算,不容易测得和实现,通常简单、高效及高精度控制是在实际工业应用中所需要的。Kim等<sup>[15]</sup>提出了一种基于干扰观测器柔性关节空间机器人的鲁棒比例-积分控制方案,将电机转子的标称状态反馈给控制器,该方案仅限于电机转子的干扰观测控制。Ulrich等<sup>[16]</sup>研究了柔性关节空间机械臂的非线性自适应输出反馈控制问题,基于奇异摄动理论提出了由分散自适应控制和线性校正控制复合而成的控制方案,柔性关节的跟踪效果在强外部干扰条件下有较弱的抗干扰性能。以上研究对柔性关节机器人动力学建模、非线性项及柔性振动做了大量的研究,但对柔性关节空间机器人系统带来的柔性振动问题考虑得不充分,在控制设计过程中会产生抖振现象。本文针对柔性关节系统添加柔性补偿并设计了削弱柔性振动的滑模控制,通过控制器消除滑模控制带来的抖振现象。

近年来滑模变结构控制因其强大的鲁棒性备受学者的关注<sup>[17-18]</sup>,但在设计滑模控制器的过程中,因惯性作用使运动点到达滑模面时产生快速切换增益,会导致控制器设计过程产生抖振现象。为同时实现柔性关节空间机器人的快速跟踪并消除系统的关节柔性振动,本文采用奇异摄动理论,

将系统分解为慢变子系统和快变子系统,针对关节柔性振动问题,可以引入关节柔性进行补偿,增强关节等效刚度,削减关节柔性振动。针对慢变子系统,设计了以时延估计为主的框架,对非线性项进行在线实时估计,避免了参数不确定性的影响,引入滑模控制器消除时延估计误差。为了减弱滑模控制带来的抖振问题,采取将滑模控制方法和滤波器相结合,实现对输出信号的滤波,大幅度削减振动幅值,为滑模控制器提供光滑的稳态位置和跟踪信号。针对柔性关节的快变子系统,采用速度差值反馈控制来抑制柔性关节的弹性振动。通过三杆柔性关节空间机械臂系统进行仿真验证该方案的可靠性。

## 1 预抓取阶段空间机器人系统模型的建立

考虑做平面运动的漂浮基柔性关节空间机器人在预抓取阶段建立几何模型如图1所示。整个系统是由自由漂浮载体 $B_0$ ,刚性机械臂 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 和柔性关节 $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ 共同组成, $X_0$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 为载体及各刚性机械臂的对称轴。建立各分体的联动坐标系 $O_i - X_i Y_i (i=0,1,2,3)$ ,其中 $O_0$ 是载体 $B_0$ 的质心, $O_i (i=0,1,2,3)$ 为各柔性关节中心位置,各刚性机械臂 $B_i$ 的质心在各转动杆的中心位置上。设 $O_0 O_1$ 之间的距离为 $L_0$ ,各刚性机械臂 $B_i$ 长度为 $L_i (i=0,1,2,3)$ ,柔性关节中心到刚性臂杆质心的距离为 $l_i (i=0,1,2,3)$ 。其中 $m_i$ 、 $J_i (i=0,1,2,3)$ 分别为各分体的质量和绕质心的转动惯量, $C$ 为系统的总质心。

建立平动惯性坐标系 $O - XY$ ,假设系统沿 $O - XY$ 平面做平面运动。此外图1中的 $q_0$ 为空间机器人基座 $B_0$ 的姿态角, $q_i$ 为各刚性机械臂 $B_i$ 的实际转角, $\theta_i$ 为各柔性关节 $O_i$ 驱动电机的实际转角。

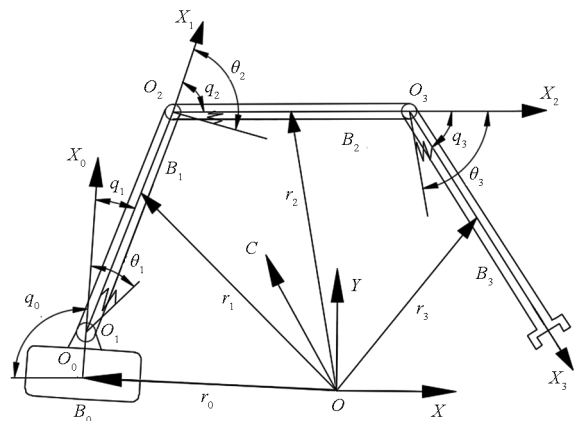


图1 柔性关节空间机器人系统

Fig. 1 Flexible-joint space robot system

对于柔性关节的空间机器人系统,根据 Spong 的理论假设,创建驱动电机转子的简化模型<sup>[19]</sup>。关节的柔性可以等效为一个介于驱动电机转子与机械臂之间刚度系数为常数的无惯量线性扭簧,简化模型如图 2 所示。当关节  $O_i$  处驱动电机转子转过角度  $\theta_i$  时,由于弹簧弹性力的作用,关节电机驱动装置输出转角  $\theta_i$  与受其驱动的刚性机械臂  $B_i$  实际转角  $q_i$  间存在差值  $a_i = \theta_i - q_i$ ;驱动电机转子和机械臂之间存在大小为  $k_i(\theta_i - q_i)$  的弹性作用力,其中  $k_i (i=0,1,2,3)$  为相应关节的刚度系数。

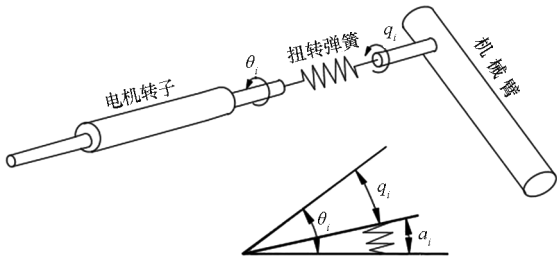


图 2 柔性关节的扭簧模型

Fig. 2 Torsional spring model of flexible-joint

在平动惯性坐标系  $O-XY$  上,假设漂浮基空间机器人各分体在平面上运动,忽略重力,机械臂系统为无外力作用的自由基漂浮多体系统。则利用 Language 法和系统动量守恒关系,推导出载体位置和姿态均不受控的柔性关节空间机器人动力学方程:

$$M(q_\theta)\ddot{q} + H(q_\theta, \dot{q}, \dot{\theta}) = \tau \quad (1)$$

$$J\ddot{\theta} + \tau = \tau_\theta \quad (2)$$

$$\tau = K(\theta - q) \quad (3)$$

其中,  $q_\theta = [q_0 \quad q^T]^T$ ,  $q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T$  为各机械臂实际关节转角的列向量,  $\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T$  为各关节电机驱动转子转动角度所组成的列向量;  $M(q_\theta) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  和  $H(q_\theta, \dot{q}, \dot{\theta}) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$  分别为机械臂连杆端的正定对称惯性矩阵及包含科氏力、离心力的列向量;  $J = \text{diag}(J_1, J_2, J_3)$  为驱动电机端的正定、对角的惯量矩阵;  $K = \text{diag}(k_1, k_2, k_3)$  为系统关节刚度矩阵,  $k_i (i=1,2,3)$  各柔性关节扭转刚度;  $\tau \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$  为柔性关节所产生的驱动刚性连杆运动的驱动力矩列向量;  $\tau_\theta \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$  为柔性关节驱动电机转子产生的控制力矩列向量。

## 2 控制器设计

### 2.1 快变子系统控制器设计

根据柔性补偿奇异摄动的思想,将柔性关节

模型转化为快慢两个子系统模型,能有效解决具有较强关节柔性机械臂控制器设计的有效方法<sup>[20]</sup>。由式(1)、式(2)和式(3)确立柔性关节机器人系统,引入关节柔性补偿控制器,降低系统关节柔性,便于奇异摄动技术的应用。选取系统控制输入规律:

$$\tau_\theta = \tau_m + K_n \tau_n \quad (4)$$

式中:  $\tau_m = -K_c \tau$  是柔性关节引入的柔性补偿项,  $K_c \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$  为正定柔性关节补偿矩阵;  $K_n = K_c + I$ ,  $I \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$  为单位矩阵;  $\tau_n \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$  为补偿后控制输入量。

将式(4)代入式(2),并联立式(3),得:

$$J(KK_n)^{-1}\ddot{\tau} + \tau = \tau_n - JK_n^{-1}\tau_n \quad (5)$$

式中,  $KK_n$  为系统理论等效刚度。为了对柔性关节  $K_c$  进行补偿,引入对角正定矩阵  $K_1 \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  以及奇异摄动正比例因子  $\varepsilon$ , 其与系统理论刚度之间满足:

$$KK_n = \frac{K_1}{\varepsilon^2} \quad (6)$$

结合奇异摄动法,定义慢变分量为  $q$ , 快变分量为  $\tau$ , 将控制律  $\tau_n$  进行如下快慢分解:

$$\tau_n = \tau_{ns} + \tau_{nf} \quad (7)$$

式中,  $\tau_{ns}$  为系统关节追踪的慢变子控制律,  $\tau_{nf}$  为抑制关节柔性振动的快变子控制律。

引入适当对角正定矩阵  $K_2 \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ , 设计快变子控制律:

$$\tau_{nf} = -\varepsilon K_2 \dot{\tau} \quad (8)$$

将式(6)~(8)代入式(5),推导出空间机器人柔性关节的快变子系统控制器,满足:

$$\varepsilon^2 J \ddot{\tau} + \varepsilon K_1 K_2 \dot{\tau} + K_1 \tau = K_1 \tau_{ns} - JK_1 (K_n)^{-1} \dot{q} \quad (9)$$

引入的奇异摄动正比例因子  $\varepsilon$  为很小值,即  $\varepsilon \rightarrow 0$ , 柔性关节的刚度系数  $K \rightarrow 0$ 。此时  $\theta \approx q$ 、 $\dot{\theta} \approx \dot{q}$ , 结合式(1)亦可导出慢变子系统动力学方程:

$$M_s(q_\theta)\ddot{q} + H_s(q_\theta, \dot{q}) = \tau_{ns} \quad (10)$$

式中,  $M_s(q_\theta) = M(q_\theta) + J(K_n)^{-1}$  为正定矩阵;  $H_s(q_\theta, \dot{q})$  为  $H(q_\theta, \dot{q}, \dot{\theta})$  简化后的列向量。

### 2.2 慢变子系统控制器设计

#### 2.2.1 引入时延估计控制

设计时延估计控制对不确定的参数进行在线实时估计,输出时延估计下的柔性关节系统慢变子控制律,再根据慢变子系统动力学方程,输出关节跟踪的变化情况。首先引入一个正定常数矩阵  $\bar{M}$ , 令:

$$[\mathbf{M}_s(\mathbf{q}_\theta) - \bar{\mathbf{M}}]\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}_s(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}}) \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})$  为柔性关节空间机械臂系统的整个不确定因素和不确定项。

结合式(10)和式(11),则慢变子系统动力学方程可以改写为:

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{ns}} = \bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}}) \quad (12)$$

在设计时延估计控制的过程中,可以根据实时数据预测  $\mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})$  的大小,对式(12)动力学方程的使用,相对避免了动力学参数不确定性、分线性等问题。导入时延估计控制策略作为主框架,便于控制器的设计,同时较容易获取  $\mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})$  的大小。

由式(12)可知,慢变子系统的控制律可以改写为:

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{ns}} = \bar{\mathbf{M}}\mathbf{u} + \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}}) \quad (13)$$

式中,  $\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})$  是  $\mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})$  的估计值,评估  $\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})$  的大小是非常困难的,可以通过时延估计评估其大小。用上一个时刻的  $\mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})^{t-L}$  近似在线估计,可以表示为:

$$\hat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}}) \approx \mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})_{t-L} \quad (14)$$

式中,引入了时延估计,  $t$  为当前时刻,定义  $L$  为时延估计时长,在 \* 的时间延迟估计值为  $*_{t-L}$ ,但是在实际应用中,设置的采样周期的频率要大于 30 倍系统宽带,此时的数字控制系统才可以看作是连续系统,选取适当的  $L$  满足要求即可<sup>[21]</sup>。

选取适当的  $L$ ,则由式(12)采集样点  $t-L$  时刻的输出力矩可表示为:

$$(\boldsymbol{\tau}_{\text{ns}})_{t-L} = \bar{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}}_{t-L} + \mathbf{C}(\mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}})_{t-L} \quad (15)$$

将式(14)代入式(15),定义控制输入为  $\mathbf{u}$ ,再结合式(13)可得慢变子控制律:

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{ns}} = (\boldsymbol{\tau}_{\text{ns}})_{t-L} + \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{u} - \ddot{\mathbf{q}}_{t-L}) \quad (16)$$

在慢变子控制律的设计过程中,会出现复杂动力学参数不确定等问题,为了让控制器设计简单,引入时延估计控制,可以利用对过去较短时长的控制输入,对现有的慢变子系统进行在线估计,如式(16)所示,但是对于  $\ddot{\mathbf{q}}_{t-L}$  的设计有所要求,可以进行在线获得,即为  $t-L$  时刻的关节加速度:

$$\ddot{\mathbf{q}}_{t-L} = \frac{\mathbf{q}_{t-L} - 2\mathbf{q}_{t-2L} + \mathbf{q}_{t-3L}}{L^2} \quad (17)$$

时延估计控制策略下,添加柔性补偿方法能有效解决较大关节柔性的问题,同时获取慢变子系统刚性臂关节角较为容易。则由式(17)推导出较小采样宽带下连续关节角度的角加速度估计

值大小。

## 2.2.2 低通滤波器下滑模控制器的设计

设柔性关节机器人系统实际控制输出为  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ ,对应的理想状态控制输出为  $\mathbf{q}_d$ ,即期望角度表示为  $\mathbf{q}_d = [q_{1d} \ q_{2d} \ q_{3d}]^T$ ,定义系统的跟踪误差为:

$$\mathbf{e} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T \quad (18)$$

式中,  $e_i = q_i - q_{id} (i=1,2,3)$ 。

引入系统辅助控制信号,设计滑模函数:

$$\mathbf{S} = \ddot{\mathbf{e}} + \lambda_1 \dot{\mathbf{e}} + \lambda_2 \mathbf{e} \quad (19)$$

式中,  $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$  且均为常数,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的取值必须满足 Hurwitz 条件,  $\mathbf{S}$  矩阵中主行列式及顺序主子式全部为正,选取值应保证  $r^2 + \lambda_1 r + \lambda_2$  的特征根具有负实部,此时滑模函数即为动态稳定的。

在设计滑模控制过程中,当系统到达滑模面时,惯性的作用使运动点到达滑模面上会带来巨大的增益切换,即系统的抖振问题。为了削弱滑模增益带来的抖振问题,滑模控制方法与滤波器相结合,实现对振动信号的滤波以及有效观测,为滑模控制器提供光滑的位置和速度信号。慢变子系统的控制律如式(16)所示,为降低滑模控制器产生的抖振问题,设计如式(20)所示的一阶惯性系统的低通滤波器。

$$Q = \frac{\Lambda}{s + \Lambda} \quad (20)$$

式中,  $\Lambda > 0$  为滤波器惯性参数,  $s$  为控制阶数,  $Q$  为单阶响应的输入项。

设计  $\mathbf{u}$  为滤波器的虚拟控制输入,  $\ddot{\mathbf{q}}$  为实际控制输入,虚拟控制输入通过低通滤波器对控制律的波动噪声进行滤波,提供光滑的角加速度信号,输出的滤波信号经时延估计控制器输出作用力矩,驱动柔性关节机器人按既定的期望轨迹运动。柔性关节机器人系统的控制结构如图 3 所示,同时式(20)可推导出:

$$\ddot{\mathbf{q}} + \Lambda \ddot{\mathbf{q}} = \Lambda \mathbf{u} \quad (21)$$

式(19)对时间求导,结合式(18)、式(21),则慢变子系统的控制律可改为:

$$\mathbf{u} = \ddot{\mathbf{q}}_d + \frac{1}{\Lambda + \lambda_1} (\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda \ddot{\mathbf{e}} - \lambda_2 \dot{\mathbf{e}}) - \eta \text{sgn}(\mathbf{S}) - k\mathbf{S} \quad (22)$$

将式(22)代入式(16)可得:

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{ns}} = (\boldsymbol{\tau}_{\text{ns}})_{t-L} + \bar{\mathbf{M}} \left[ \ddot{\mathbf{q}}_d + \frac{1}{\Lambda + \lambda_1} (\ddot{\mathbf{q}}_d + \Lambda \ddot{\mathbf{e}} - \lambda_2 \dot{\mathbf{e}}) - \eta \text{sgn}(\mathbf{S}) - k\mathbf{S} - \ddot{\mathbf{q}}_{t-L} \right] \quad (23)$$

式中,  $k, \eta > 0$  为定常数。

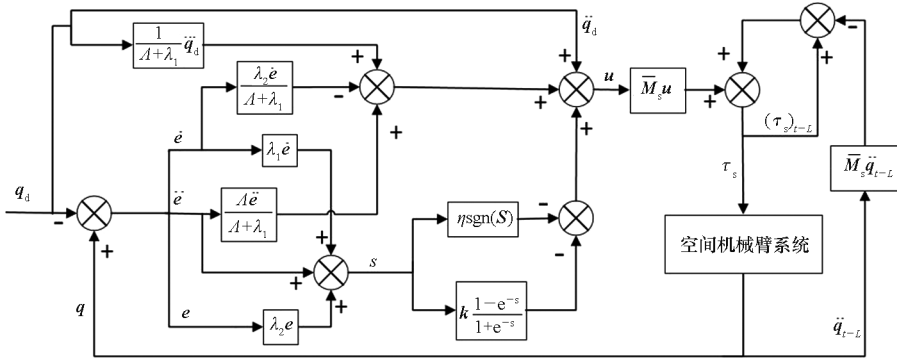


图 3 控制器结构框图

Fig.3 Block diagram of controller structure

### 3 稳定性分析

#### 3.1 估计误差的有界性分析

由式(12)~(14)可知,定义  $u$  与  $\ddot{q}$  之间的误差为  $\Delta$ ,即

$$\Delta = \bar{M}^{-1} [C(q_\theta, \dot{q}) - \hat{C}(q_\theta, \dot{q})] \quad (24)$$

$$M_s(q_\theta)\Delta = M_s(q_\theta)u + H_s(q_\theta, \dot{q}) - \tau_{ns} \quad (25)$$

结合式(25)和式(13)得:

$$M_s(q_\theta)\Delta = M_s(q_\theta)u + H_s(q_\theta, \dot{q}) - \bar{M}u - \hat{C}(q_\theta, \dot{q}) \quad (26)$$

由式(14)并结合式(11)的  $t-L$  状态可得:

$$\hat{C}(q_\theta, \dot{q}) = [M_s(q_\theta)_{t-L} - \bar{M}] \ddot{q}_{t-L} + H_s(q_\theta, \dot{q})_{t-L} \quad (27)$$

将式(27)代入式(26)可得:

$$M_s(q_\theta)\Delta = [M_s(q_\theta) - M_s(q_\theta)_{t-L}] \ddot{q}_{t-L} + \alpha + [M_s(q_\theta) - \bar{M}] \Delta_{t-L} + [M_s(q_\theta) - \bar{M}] (u - u_{t-L}) \quad (28)$$

式中,存在

$$\alpha = H_s(q_\theta, \dot{q}) - H_s(q_\theta, \dot{q})_{t-L} \quad (29)$$

整理式(28)可得:

$$\Delta = N\Delta_{t-L} + N(u - u_{t-L}) + \beta \quad (30)$$

式中,式(30)存在

$$\begin{cases} N = E - M_s(q_\theta)^{-1} \bar{M} \\ \beta = [E - M_s(q_\theta)^{-1} M_s(q_\theta)_{t-L}] \ddot{q}_{t-L} + M_s(q_\theta)^{-1} \alpha \end{cases} \quad (31)$$

慢变子系统在时延估计控制下的控制输入与既定轨迹期望输入存在误差  $\Delta$ ,由式(30)可知,当选择适当的  $\bar{M}$ ,可使得  $\|N\| < 1$ ,同时足够小的采样宽带  $L$  使得  $u - u_{t-L}$  与  $\beta$  均为有界的变量。即当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\|N\| < 1$ ,  $\Delta$  是收敛的,则  $\Delta$  为与状态有关的有界非线性项,令  $\Delta = [\delta_0 \ \delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3]^T$ ,可选取  $d$  为正定常数,定义关

节角控制输入和期望输入误差存在

$$|\delta_i| \leq d \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (32)$$

#### 3.2 估计误差的渐进稳定性分析

定义 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (33)$$

结合式(21)和式(22),由式(33)对时间求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T \dot{S} = S^T (\ddot{e} + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e) \\ &= S^T (\ddot{q} - \ddot{q}_d + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e) \\ &= S^T [(\Lambda + \lambda_1)u - \Lambda \ddot{q} - \ddot{q}_d \delta - \lambda_1 \dot{q}_d \delta - \lambda_1 \Delta + \lambda_2 e] \\ &= S^T [(\Lambda + \lambda_1)(-\eta \text{sgn}(S) - kS) - \lambda_1 \Delta] \end{aligned} \quad (34)$$

式中,  $\Lambda, \lambda_1, \lambda_2, \eta, k$  均为大于零的定常数,  $S, \Delta$  均为列向量阵,  $\text{sgn}(S)$  为  $S$  的符号函数。设计  $S = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]^T$  ( $n=0, 1, 2, 3$ ),  $\Delta = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_n]^T$  ( $n=0, 1, 2, 3$ ), 则对于符号函数存在

$$\text{sgn}(s_i) = \begin{cases} -1 & s_i < 0 \\ 0 & s_i = 0 \\ 1 & s_i > 0 \end{cases} \quad (35)$$

联立式(32)和式(33),则式(34)可推导为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \sum_{i=1}^n [- (\Lambda + \lambda_1) \eta |s_i| - k |s_i|^2 - \lambda_1 s_i \delta_i] \\ &= - \sum_{i=1}^n |s_i| [(\Lambda + \lambda_1) \eta + k |s_i| + \lambda_1 \delta_i \text{sgn}(s_i)] \\ &\leq - \sum_{i=1}^n |s_i| [(\Lambda + \lambda_1) \eta - \lambda_1 d] \end{aligned} \quad (36)$$

由式(32)知  $d$  为确定的正常数,选取适当的  $d, \eta, \Lambda$  以及  $\lambda_1, \lambda_2$  满足 Hurwitz 判定,仅当  $\lambda_1(d - \eta) \leq \lambda \eta$  成立时,式(37)恒成立,即所设计的控制律是渐近稳定的。

$$\dot{V} \leq 0 \quad (37)$$

适当的  $\bar{M}$  矩阵和适当的采样宽带  $L$  下,  $\Delta$  是

有界的,可以将其看作时延估计下系统的有界外部干扰。在  $\eta$ 、 $\Lambda$ 、 $\lambda_1$ 、 $d$  适当的取值下,使得  $\lambda_1(d - \eta) \leq \Lambda\eta$ ,得证式(37)成立,即所设计的控制系统是渐进稳定的,在有限时间  $T$  内,可使得  $\lim_{t \rightarrow T} \mathbf{S} = \mathbf{0}$ 、 $\lim_{t \rightarrow T} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{0}$ 、 $\lim_{t \rightarrow T} \ddot{\mathbf{e}} = \mathbf{0}$ ,实现机器人系统有限时间内的跟踪。

### 4 模拟仿真验证

为验证该控制方案的可靠性和有效性,本文采用数值仿真进行验证,以图1所示做平面运动的柔性三杆空间机械臂为例,设置系统惯性参数为: $m_0 = 40 \text{ kg}$ ,  $m_1 = 2 \text{ kg}$ ,  $m_2 = 1 \text{ kg}$ ,  $m_3 = 2 \text{ kg}$ ,  $J_0 = 37.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $J_1 = 1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $J_2 = 1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $J_3 = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $L_0 = 1.5 \text{ m}$ ,  $L_1 = 3 \text{ m}$ ,  $L_2 = 3 \text{ m}$ ,  $L_3 = 3 \text{ m}$ ,  $l_1 = 1.5 \text{ m}$ ,  $l_2 = 1.5 \text{ m}$ ,  $l_3 = 1.5 \text{ m}$ ,  $\mathbf{K} = \text{diag}(100, 100, 100)$ 。

柔性关节补偿矩阵  $\mathbf{K}_c = \text{diag}(100, 100, 100)$ ,于时延估计控制策略中引入柔性补偿的方法协调使其有较大的关节柔性适应范围,经由低通滤波器可实现在较短时间内使信号输出达到平滑稳定。

设定柔性关节机械臂系统的各个关节铰的期望轨迹为: $q_{1d} = -1.5 \sin\left(\frac{\pi t}{5}\right) + \frac{\pi}{8}$ ,  $q_{2d} = 1.5 \sin\left(\frac{\pi t}{5}\right) + \frac{\pi}{4}$ ,  $q_{3d} = \sin\left(\frac{\pi t}{5}\right) + \frac{\pi}{4}$ 。

在仿真参数选取具有较大宽带时,验证本文设计的控制策略具有较强普遍性,选取相对较优的惯性参数组进行仿真,设置仿真运动初始值和惯性参数为: $q_1 = 0.1 \text{ rad}$ ,  $q_2 = 0 \text{ rad}$ ,  $q_3 = 0 \text{ rad}$ ,  $k = 10$ ,  $\eta = 10$ ,  $\Lambda = 10$ ,  $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 100$ ,  $\bar{\mathbf{D}} = \text{diag}(0.8, 0.8, 0.8)$ ,  $L = 0.001 \text{ s}$ 。

为更好地验证所设计控制方法的先进性,引入对比仿真实验。

方案1:以本文设计的基于低通滤波器下的时延估计控制(time-delay estimation of low-pass filter control, LFC)为主体,空间机器人系统的控制律为式(23)。

方案2:设计基于传统滑模的比例-积分-微分(proportion-integration-differentiation, PID)控制算法在柔性关节空间机器人系统中进行仿真,设计闭环系统下的PID滑模函数为  $\mathbf{S} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int \mathbf{e} dt + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}$ ,其中空间机器人系统的惯性参数可表示为: $\mathbf{K}_d = \text{diag}(20, 20, 20)$ 、 $\mathbf{K}_i = \text{diag}(10, 10, 10)$ 、 $\mathbf{K}_p = \text{diag}(100, 100, 100)$ 。

控制律表示为:

$$\tau_{ns} = (\tau_{ns})_{t-L} + \bar{\mathbf{M}}[\ddot{\mathbf{q}}_d + \frac{1}{\mathbf{K}_d}(-\mathbf{K}_i \mathbf{e} - \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{e}}) - \eta \text{sgn}(\mathbf{S}) - k\mathbf{S} - \ddot{\mathbf{q}}_{t-L}]$$

限于特殊的外太空环境无法及时对空间机器人进行维护,驱动器关节随服务年限延长而发生异常情况,即抗干扰性能的验证实验表述为:设置整个关节轨迹跟踪过程所用时间  $T = 20 \text{ s}$ ,当仿真时间  $10 \text{ s} \leq t \leq 15 \text{ s}$ ,关节2和关节3突发故障失去50%的驱动力矩,此情况下验证两种方案的抗干扰性能。仿真结果如图4~13所示,图4、图5和图6分别为柔性关节机械臂各关节角度  $q_1$ 、 $q_2$  和  $q_3$  期望轨迹和实际轨迹的对比图;图7、图8和图9分别为柔性关节机械臂各关节角度  $q_1$ 、 $q_2$  与  $q_3$  跟踪误差示意图;图10、图11和图12分别为无滤波器情况下柔性关节机械臂关节角度  $q_1$ 、 $q_2$  和  $q_3$  的期望轨迹和实际轨迹的对比图;图13为关闭关节柔性补偿时各关节角度的跟踪误差仿真曲线图。

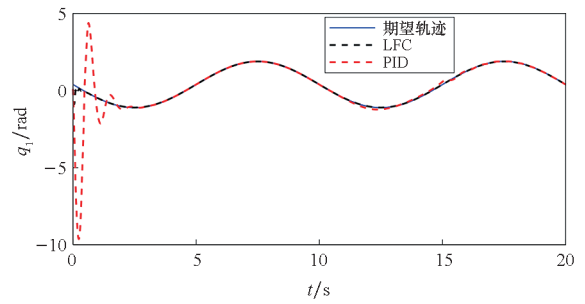


图4 关节角度  $q_1$  的轨迹跟踪

Fig. 4 Trajectory tracking of joint angle  $q_1$

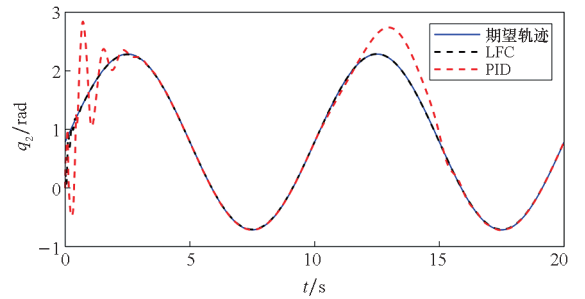


图5 关节角度  $q_2$  的轨迹跟踪

Fig. 5 Trajectory tracking of joint angle  $q_2$

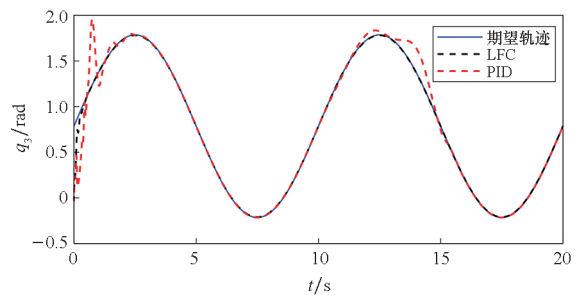


图6 关节角度  $q_3$  的轨迹跟踪

Fig. 6 Trajectory tracking of joint angle  $q_3$

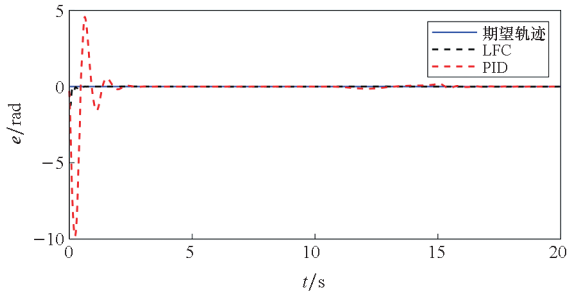


图 7 关节角度  $q_1$  的跟踪误差

Fig. 7 Trajectory tracking errors of joint angle  $q_1$

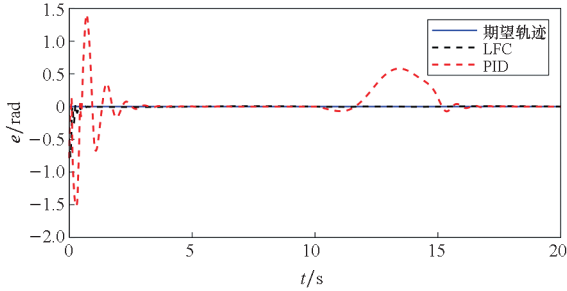


图 8 关节角度  $q_2$  的跟踪误差

Fig. 8 Trajectory tracking errors of joint angle  $q_2$

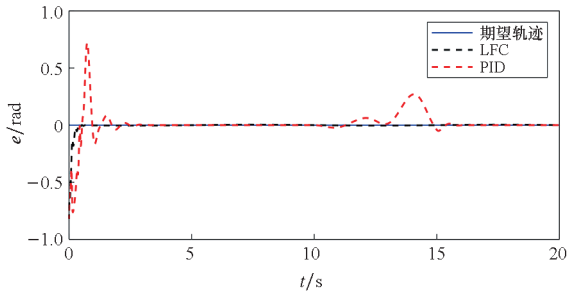


图 9 关节角度  $q_3$  的跟踪误差

Fig. 9 Trajectory tracking errors of joint angle  $q_3$

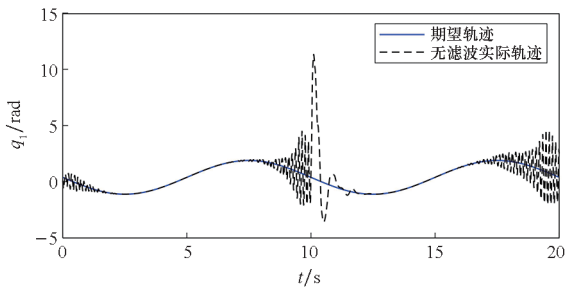


图 10 无滤波器时关节角  $q_1$  轨迹跟踪

Fig. 10 Trajectory tracking of joint angle  $q_1$  without filter

图 4 ~ 9 为添加滤波器的关节角度跟踪图以及跟踪误差图,从图中的仿真结果可以看出,在选择初始值有较大误差的情况下,设计基于低通滤波器对柔性关节添加柔性补偿的时延估计控制能够使柔性关节角轨迹快速而稳定地跟踪上既定的期望轨迹。在初始阶段,惯性作用使运动点穿越滑模面,信号的增益切换会给系统带来巨大的抖

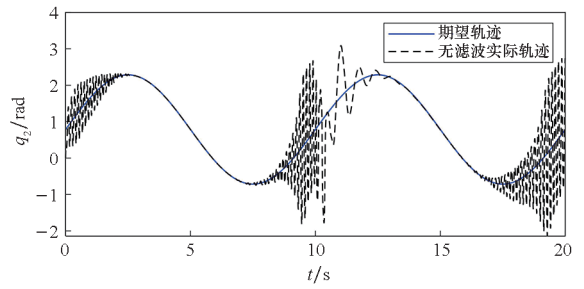


图 11 无滤波器时关节角  $q_2$  轨迹跟踪

Fig. 11 Trajectory tracking of joint angle  $q_2$  without filter

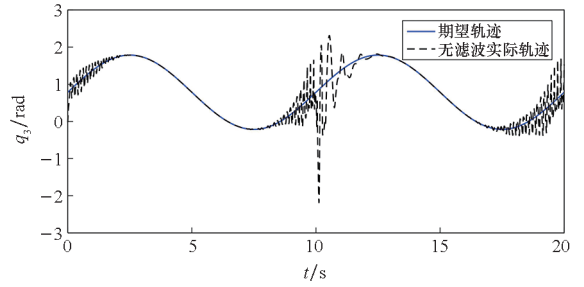


图 12 无滤波器时关节角  $q_3$  轨迹跟踪

Fig. 12 Trajectory tracking of joint angle  $q_3$  without filter

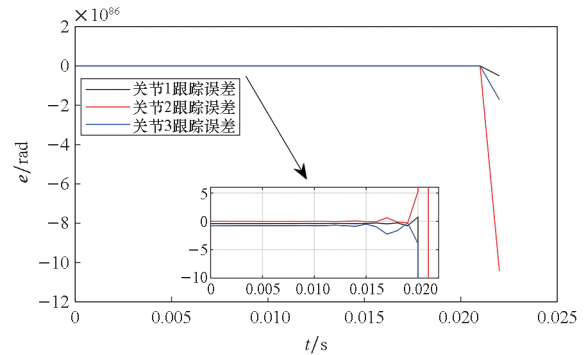


图 13 关闭关节柔性补偿时的仿真结果

Fig. 13 Simulation results of closing joint flexibility compensation

振问题,仿真结果显示,滑模控制与滤波器相结合能有效削弱抖振的幅度,为空间机器人系统提供光滑的位置信号和角度信号。当仿真时间  $t = 2$  s 时,关节角跟踪上期望轨迹,同时跟踪误差收敛到零,实现输出信号达到平衡稳定状态。柔性关节空间机器人基于传统 PID 滑模控制的关节跟踪控制中有较大的时间延迟响应,且关节跟踪响应幅值较大。时间  $10 \text{ s} \leq t \leq 15 \text{ s}$  时,关节 2 和关节 3 出现力矩输出损失 50% 的故障,相对于传统 PID 滑模控制,本文所设计的控制策略有较强的抗干扰性能。图 10 ~ 12 采用无滤波的时延估计控制方法,仿真结果与图 4 ~ 6 对比可以看出,当初始输入信号存在较大误差时,关闭滤波器的滤波作用,实际输出信号到达滑模平衡位置时处于上下剧烈的抖振状态;当输入信号波动较小时,滑模控

制和时延估计控制对其进行共同控制的情况下,出现短时间段的平稳阶段;当输入信号又出现较大波动时,实际输出信号产生剧烈抖振现象,即在有限时间内无法跟踪上既定的期望轨迹。从图13的仿真结果可以看出关闭关节柔性补偿器时,输出的关节跟踪误差信号在较短时间达到无穷大,动力学参数存在奇异,传统的奇异摄动控制方法在此处受柔性关节属性的限制。通过对仿真结果进行对比验证该控制方案的可靠性,发现本文方法适用于一般柔性关节空间机器人的控制。

## 5 结论

1) 本文主要讨论漂浮基大柔性关节空间机器人系统预抓取阶段的跟踪控制问题,利用系统线动量、角动量守恒关系以及拉格朗日的方法导出漂浮基柔性关节空间机器人系统动力学模型。同时引入一种关节柔性补偿器,提高关节等效刚度,基于奇异摄动方法,将柔性关节机械臂系统分解为一个慢变子系统和一个快变子系统。

2) 提出由慢变子系统的时延估计控制和快变子系统的速度差值反馈控制组成混合控制系统。以时延估计为主框架能有效避免控制参数带来的不确定性、耦合性、非线性等问题,能够对控制设计中的误差进行较好的补偿。

3) 引入滑模控制对参数变化不灵敏的特性能很好地平衡系统的动态性能,为了消除滑模控制给系统带来的抖振问题,将滑模控制方法与滤波器相结合,实现对输出信号的滤波,削减振动幅值,提高控制的稳定性和动态性能。本文研究的控制器能有效抑制抖振现象,响应迅速且控制精度高,有较强的抗不确定干扰性能。

## 参考文献 (References)

- [1] WU Y H, YU Z C, LI C Y, et al. Reinforcement learning in dual-arm trajectory planning for a free-floating space robot[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 98: 105657.
- [2] XUE Z H, LIU J G, WU C C, et al. Review of in-space assembly technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(11): 21-47.
- [3] 王兴龙, 蔡亚星, 陈士明, 等. 多源信息融合在空间态势感知领域的应用与发展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1): 11-20.  
WANG X L, CAI Y X, CHEN S M, et al. Application and development of multi-source information fusion in space situational awareness[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(1): 11-20. (in Chinese)
- [4] ZHAO P Y, LIU J G, WU C C. Survey on research and development of on-orbit active debris removal methods[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(11): 2188-2210.
- [5] 孙永军, 王钊, 刘伊威, 等. 空间非合作目标捕获方法综述[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(3): 74-90.  
SUN Y J, WANG Q, LIU Y W, et al. A survey of non-cooperative target capturing methods[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(3): 74-90. (in Chinese)
- [6] YAN L, XU W F, HU Z H, et al. Virtual-base modeling and coordinated control of a dual-arm space robot for target capturing and manipulation[J]. Multibody System Dynamics, 2019, 45(4): 431-455.
- [7] SEDDAOUI A, SAAJ C M. Collision-free optimal trajectory generation for a space robot using genetic algorithm[J]. Acta Astronautica, 2021, 179: 311-321.
- [8] JIN R Y, ROCCO P, GENG Y H. Cartesian trajectory planning of space robots using a multi-objective optimization[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 108: 106360.
- [9] JIN M H, ZHOU C, LIU Y C, et al. Analysis of reaction torque-based control of a redundant free-floating space robot[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(5): 1765-1776.
- [10] MU R N, TAN S J, WU Z G, et al. Coupling dynamics of super large space structures in the presence of environmental disturbances[J]. Acta Astronautica, 2018, 148: 385-395.
- [11] PEREIRA E, APHALE S S, FELIU V, et al. Integral resonant control for vibration damping and precise tip-positioning of a single-link flexible manipulator[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(2): 232-240.
- [12] XIE L M, YU X Y, CHEN L. Robust fuzzy sliding mode control and vibration suppression of free-floating flexible-link and flexible-joints space manipulator with external interference and uncertain parameter[J]. Robotica, 2022, 40(4): 997-1019.
- [13] 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.
- [14] SHANG W W, ZHANG B Y, ZHANG B, et al. Synchronization control in the cable space for cable-driven parallel robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(6): 4544-4554.
- [15] KIM M J, CHUNG W K. Disturbance-observer-based PD control of flexible joint robots for asymptotic convergence[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(6): 1508-1516.
- [16] ULRICH S, SASIADEK J Z, BARKANA I. Nonlinear adaptive output feedback control of flexible-joint space manipulators with joint stiffness uncertainties[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(6): 1961-1975.
- [17] XIE Z C, SUN T, KWAN T H, et al. A new reinforcement learning based adaptive sliding mode control scheme for free-floating space robotic manipulator[J]. IEEE Access, 2020, 8: 127048-127064.
- [18] NICOLIS D, ALLEVI F, ROCCO P. Operational space model predictive sliding mode control for redundant manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(4): 1348-1355.
- [19] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 109(4): 310-318.
- [20] AI H P, ZHU A, WANG J J, et al. Buffer compliance control of space robots capturing a non-cooperative spacecraft based on reinforcement learning[J]. Applied Sciences, 2021, 11(13): 5783.
- [21] HAN D K, CHANG P H. Robust tracking of robot manipulator with nonlinear friction using time delay control with gradient estimator[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(8): 1743-1752.