

变长度柔性机械臂的双柔性伺服驱动系统 振动抑制策略

刘佳琪¹, 李小彭¹, 尹猛², 周赛男¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055)

摘要: 变长度的柔性机械臂在旋转运动过程中由于受到环境扰动以及自身柔性的影响导致了伺服驱动系统输出转速的波动现象, 这会加剧柔性机械臂的振动, 严重影响了柔性机械臂的运动精度. 基于此, 设计了一种基于干扰观测器的PI控制策略来抑制伺服驱动系统转速的波动. 首先使用拉格朗日原理建立了双柔性伺服驱动系统的动力学模型并分析了双柔性伺服驱动系统的传动特性; 其次将基于干扰观测器的PI控制策略应用于双柔性伺服驱动系统的速度环中, 并通过鲁棒稳定性分析设计干扰观测器中的低通滤波器参数; 最后开展了数值仿真分析和控制实验. 实验结果验证了提出的控制策略能够有效减少变长度柔性机械臂的转速波动, 提高伺服驱动系统的运动精度.

关键词: 伺服驱动系统; 转速波动; 关节柔性; 控制策略; PI控制

中图分类号: TH 212; TP 213.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)04-0530-10

Vibration Suppression Strategy for Dual-Flexible Servo Drive System in Flexible Manipulator of Variable Length

LIU Jia-qi¹, LI Xiao-peng¹, YIN Meng², ZHOU Sai-nan¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China. Corresponding author: LI Xiao-peng, E-mail: xpli@me.neu.edu.cn)

Abstract: The output rotational speed of the servo drive system fluctuates due to the influence of environmental disturbances and the flexibility of the flexible manipulator with variable length during the process of rotation. The phenomenon will exacerbate the vibration of the flexible manipulator and affect the motion accuracy of the flexible manipulator seriously. Therefore, a proportional-integral (PI) control strategy based on the disturbance observer is designed to suppress the rotational speed fluctuation of the servo drive system. Firstly, the dynamic model of the dual-flexible servo drive system was established and the transmission characteristics of the dual-flexible servo drive system were analyzed by using the Lagrange's theorem. Then the PI control strategy based on the disturbance observer was applied to the speed loop in the dual-flexible servo drive system. The low pass filter parameters of the disturbance observer were designed by robust stability analysis. Finally, numerical simulation analysis and control experiments were carried out. The results verify that the proposed control strategy can effectively reduce the rotational speed fluctuation of the flexible manipulator with variable length and improve the motion accuracy of the servo drive system.

Key words: servo drive system; rotational speed fluctuation; joint flexibility; control strategy; PI control

相比较于刚性机械臂, 柔性机械臂具有质量轻、回转半径大等优点^[1]. 由于柔性机械臂是细长结构且本身材料刚度低, 所以在回转运动过程中机械臂末端会存在小变形, 这种小变形会导致末

收稿日期: 2022-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275090); 辽宁省应用基础研究计划项目(101300159).

作者简介: 刘佳琪(1996-), 女, 辽宁鞍山人, 东北大学博士研究生; 李小彭(1976-), 男, 江西宁都人, 东北大学教授, 博士生导师.

端振动现象.柔性机械臂伺服驱动系统由伺服电机、独立关节和负载组成.目前柔性机械臂的独立关节通过谐波减速器、弹性联轴器等柔性元件传递力矩.因此,柔性机械臂的独立关节具有扭转刚度,可以将其等效为柔性关节^[2].此外,柔性机械臂伺服驱动系统中的负载是柔性细长结构,所以,柔性机械臂的伺服驱动应同时考虑关节柔性和负载柔性的影响.将同时具有柔性关节和柔性负载的伺服驱动系统称为双柔性伺服驱动系统^[3].而柔性机械臂的伺服驱动系统是一种典型的双柔性伺服驱动系统.

柔性机械臂是一个转角和模态强耦合的高度非线性的复杂系统.相较于固定臂长的柔性机械臂,带伸缩臂的柔性机械臂^[4]的运动过程更难控制.带伸缩臂的柔性机械臂在运动过程中,由于执行不同任务目标位置不同,所以机械臂的臂长不同,进而导致伺服驱动系统的参数发生了变化.其中伺服驱动系统负载的长度、转动惯量是直接变化量.柔性机械臂伺服驱动系统的参数随不同工况的位姿变化而变化.柔性机械臂伺服驱动系统参数的非线性变化和伺服系统的双柔性会引起伺服驱动系统输出转速的波动,进而影响柔性机械臂的控制精度^[5].因此,高精度的柔性机械臂需要设计相对应的控制策略来降低系统输出转速的波动.

针对柔性机械臂伺服驱动系统中柔性关节和柔性负载的动力学建模问题,许多学者开展了深入的研究.Spong等^[6]首先提出了将机器人柔性关节等效为由扭簧和阻尼连接的双惯量系统.文献[7]建立了考虑柔性关节的机器人整体动力学方程.文献[8]建立了包含双柔性关节的双连杆机械臂动力学方程.针对双柔性伺服驱动系统中柔性负载的建模问题,文献[9]将柔性负载等效为柔性梁模型.文献[10]应用模态分析方法描述了柔性负载末端的变形,并使用拉格朗日方法建立了欧拉-伯努利梁的动力学方程.文献[11]使用有限元方法建立了欧拉-伯努利梁的精确动力学方程.关于双柔性伺服驱动系统的建模问题,文献[12]使用有限元方法建立了包含关节柔性和负载柔性的动力学方程.

通常伺服驱动系统的控制方法主要包括主动控制策略和被动控制策略.主动控制策略包括PID(proportional-integral-derivative)控制、滑模控制、神经网络控制、模糊自适应控制等策略.文献[13]使用PID控制策略,使机械臂柔性关节获得良好的速度输出.文献[14]使用滑模控制策略,

使机械臂伺服驱动系统能够实现平稳跟踪.文献[15]使用神经网络控制策略对伺服驱动系统中的不确定部分进行辨识.文献[16]使用模糊自适应控制策略通过实时调整控制器参数,实现机械臂伺服系统精确的输出.被动控制策略主要包括陷波器和低通滤波器等策略.针对机械臂伺服系统受到外界干扰力矩影响的问题,文献[17]使用干扰观测器(disturbance observer, DOB),对外界干扰进行观测和补偿.文献[18]将干扰观测器用于估计伺服驱动系统中的参数扰动、负载扰动等耦合干扰进行估计并在控制器中补偿.观测器中低通滤波器的设计是伺服驱动系统干扰观测器的核心问题.文献[19]在满足观测器内环稳定性的基础上,提出了满足整个闭环系统稳定性的低通滤波器的设计方法.

本文使用模态分析法和拉格朗日方法建立了双柔性伺服驱动系统的动力学方程,采用基于干扰观测器的PI控制策略减小系统输出转速的波动,提高柔性机械臂的运动精度.通过干扰观测器对双柔性伺服驱动系统的外界摩擦力矩进行观测和补偿,减少系统因外界干扰而引起的输出转速波动.本文的主要贡献是建立了双柔性伺服驱动系统的动力学模型和使用基于干扰观测器的PI控制策略减少系统输出转速的波动.本文所建立的双柔性伺服驱动系统的动力学将关节的柔性和负载的柔性同时加以考虑,相比于文献[12]所建立的动力学方程更具有一般性,并且将系统参数的时变特性加以考虑.相比于文献[13]所提出的基于PI控制的方法,本文将负载的柔性和外界干扰的因素加以考虑,所提出的针对双柔性伺服驱动系统的控制策略能够有效减少输出转速的波动.

1 双柔性伺服驱动系统动力学建模

双柔性伺服驱动系统可以认为是由单柔性关节伺服系统和单柔性负载伺服系统的组合.将柔性关节和柔性负载进行简化后的双柔性伺服驱动系统模型如图1所示.图1中, θ_m 和 θ_l 表示电机转角和柔性负载转角; T_m 表示电磁驱动力矩; K_s 表示关节扭转刚度; J_m 和 J_l 表示电机和柔性负载的转动惯量; $h(x, t)$ 表示柔性负载的横向变形; XOY 和 x_0Oy_0 表示柔性负载的静态和动态坐标系.为建立双柔性伺服驱动系统的动力学模型,需先建立单柔性关节伺服驱动系统的动力学模型.参考文献[13],柔性关节伺服驱动系统动力学方程如式(1)所示:

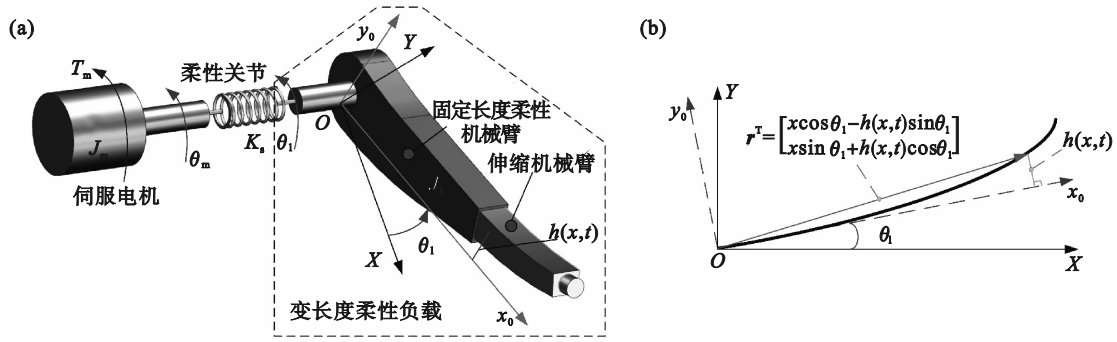


图 1 变长度机械臂双柔性伺服驱动系统模型

Fig. 1 Model of the dual-flexible servo drive system with the variable-length manipulator
(a) 伺服驱动系统模型示意图; (b) 双柔性伺服驱动系统变形描述.

$$\left. \begin{aligned} J_m \dot{\omega}_m &= T_m - K_s(\theta_m - \theta_1) = T_m - T_s, \\ J_1 \dot{\omega}_1 &= K_s(\theta_m - \theta_1) - T_1 = T_s - T_l, \\ T_s &= K_s(\theta_m - \theta_1). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中: ω_m 表示电机角速度; ω_1 表示机械臂角速度; T_s 表示轴力矩; T_l 表示负载力矩.

柔性负载相较于刚性负载, 其末端在运动过程中更容易产生小变形. 柔性负载末端的变形如式(2)所示^[4,20]:

$$\left. \begin{aligned} h(x, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) \eta_i(t), \\ \phi_i(x) &= \text{ch}(\beta_i x) - \cos(\beta_i x) + \\ &\quad \varsigma_i (\text{sh}(\beta_i x) - \sin(\beta_i x)), \\ \varsigma_i &= -\frac{\text{sh}(\beta_i l) - \sin(\beta_i l)}{\text{ch}(\beta_i l) + \cos(\beta_i l)}, \\ \cos(\beta_i l) \text{ch}(\beta_i l) &= -1, \\ f_i &= \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中: $\phi_i(x)$ 表示第 i 阶模态函数; $\eta_i(t)$ 表示第 i 阶模态坐标; β_i 表示模态函数特征根值; l 表示机械臂的长度; ς_i 表示记号; f_i 表示柔性负载的第 i 阶固有频率; ρ 表示柔性负载的体密度; A 表示柔性连杆的横截面积; E 表示柔性负载的弹性模量; I 表示柔性负载的截面惯性矩.

柔性负载的水平运动可以看成是大范围的转动和小范围的弹性变形运动的叠加. 因此, 柔性负载上任意一点的位移 r^T 表示为

$$r^T = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta_1 - h(x, t) \sin \theta_1 \\ x \sin \theta_1 + h(x, t) \cos \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

双柔性伺服驱动系统的动能 T 由柔性负载的动能和柔性关节的动能组成, 如式(4)所示:

$$T = \frac{1}{2} \rho A \int_0^l \dot{r}^T \dot{r} dx + \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2. \quad (4)$$

双柔性伺服驱动系统的势能 V 由柔性负载的弹性势能和柔性关节的弹性势能组成, 如式(5)所示:

$$V = \frac{1}{2} EI \int_0^l \frac{\partial^2 h(x, t)}{\partial x^2} dx + \frac{1}{2} K_s (\theta_1 - \theta_m)^2. \quad (5)$$

根据拉格朗日动力学方程可得到式(6):

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_m} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_m} + \frac{\partial V}{\partial \theta_m} &= T_m - K_s (\theta_m - \theta_1), \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_1} + \frac{\partial V}{\partial \theta_1} &= K_s (\theta_m - \theta_1), \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\eta}_i(t)} \right) - \frac{\partial T}{\partial \eta_i(t)} + \frac{\partial V}{\partial \eta_i(t)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据式(6)可得到双柔性伺服驱动系统的动力学方程, 如式(7)所示:

$$\left. \begin{aligned} J_m \ddot{\theta}_m - K_s (\theta_1 - \theta_m) &= T_m, \\ \ddot{\theta}_1 \int_0^l \rho A x^2 dx + \ddot{\theta}_1 \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i(t)^2 + 2\dot{\theta}_1 \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i(t) \dot{\eta}_i(t) + \\ \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{\eta}_i(t) \int_0^l \rho A x \phi_i(x) dx &= K_s (\theta_m - \theta_1), \\ \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{\eta}_i(t) + \ddot{\theta}_1 \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \rho A x \phi_i(x) dx - \dot{\theta}_1^2 \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i(t) + \\ \sum_{i=1}^{\infty} f_i^2 \ddot{\eta}_i(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据文献[21]可知, 动力学方程中的耦合非线性项对动力学特性的影响十分小. 因此为了简化动力学方程, 耦合非线性项可以去掉. 整理可得到化简后的动力学方程, 如式(8)所示:

$$\left. \begin{aligned} J_m \ddot{\theta}_m - K_s (\theta_1 - \theta_m) &= T_m, \\ \ddot{\theta}_1 \int_0^l \rho A x^2 dx + \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{\eta}_i(t) \int_0^l \rho A x \phi_i(x) dx &= \\ K_s (\theta_m - \theta_1), \\ \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{\eta}_i(t) + \ddot{\theta}_1 \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \rho A x \phi_i(x) dx + \sum_{i=1}^{\infty} f_i^2 \ddot{\eta}_i(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)可以整理成如式(9)所示的形式,

$$\left. \begin{aligned} J_m \ddot{\theta}_m &= T_m - K_s(\theta_m - \theta_1), \\ J_1 \ddot{\theta}_1 + \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{\eta}_i(t) F_{ai} &= K_s(\theta_m - \theta_1), \\ \ddot{\eta}_i(t) + \ddot{\theta}_1 F_{ai} + f_i^2 \ddot{\eta}_i(t) &= 0, \\ F_{ai} &= \int_0^l \rho A x \phi_i(x) dx. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中, F_{ai} 表示耦合系数.

式(9)表示化简后的双柔性伺服驱动系统的动力学方程,对式(9)进行拉普拉斯变换后得到式(10):

$$\left. \begin{aligned} s^2 J_m \theta_m &= T_m - K_s(\theta_m - \theta_1), \\ s^2 J_1 \theta_1 + \sum_{i=1}^{\infty} s^2 \eta_i(t) F_{ai} &= K_s(\theta_m - \theta_1), \\ s^2 \eta_i(t) + s^2 \theta_1 F_{ai} + f_i^2 \eta_i(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, s 表示拉普拉斯算子.

为了便于分析关节柔性和负载柔性两种柔性的作用关系,将式(10)进行模态截断处理,取前三阶模态则可以得到考虑双柔性伺服驱动系统的传递函数,如式(11)和式(12)所示:

$$\frac{\theta_m(s)}{T_m(s)} = \frac{1}{s^2 J_m + K_s - \frac{K_s^2}{s^2 J_1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{s^4 F_{ai}^2}{s^2 + f_i^2} + K_s}}, \quad (11)$$

$$\frac{\theta_1(s)}{T_m(s)} = \frac{1}{(s^2 J_m + K_s) \left(\frac{s^2 J_1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{s^4 F_{ai}^2}{s^2 + f_i^2} + K_s}{K_s} \right) - K_s}. \quad (12)$$

在实际的伺服驱动系统中,柔性负载的高阶模态不易被激发.因此本文保留了柔性负载的前三阶模态,忽略其余高阶模态.根据式(11)和式(12)可得到双柔性伺服驱动系统的伯德图,如图2所示.通过图2可知:因关节柔性导致的突变主要发生在低频阶段.此外,双柔性伺服驱动系统一阶模态所激发的突变同样发生在低频区域;相反,双柔性伺服驱动系统的高阶模态所激发的突变发生在高频阶段;由关节柔性和负载柔性所导致的突变分布在全频域.

2 基于干扰补偿的控制策略

高精度机器人关节伺服驱动系统采用三环控制策略,分别是位置环、速度环、电流环.根据文献[22],速度环与电流环带宽差别较小,因此可以忽略电流环的影响.本文只考虑双柔性伺服驱动系统的速度环控制策略.

根据式(12)可以求得双柔性伺服驱动系统

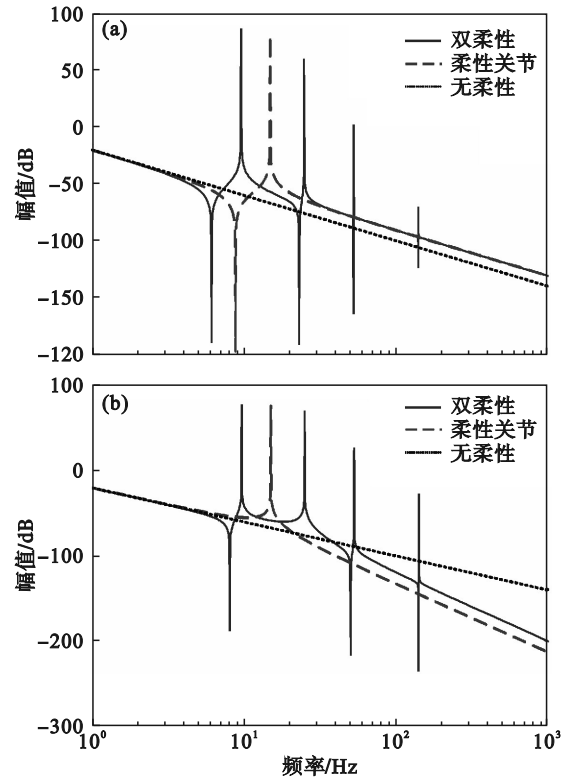


图2 双柔性伺服驱动系统伯德图

Fig. 2 Bode diagram of the dual-flexible servo drive system

(a) —电磁驱动力矩—电机端转角;

(b) —电磁驱动力矩—负载端转角.

中电机端转速到电磁驱动力矩的传递函数,如式(13)所示.式(13)即为系统受控对象的传递函数,

$$\frac{\omega_m(s)}{T_m(s)} = \frac{s}{s^2 J_m + K_s - \frac{K_s^2}{s^2 J_1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{s^4 F_{ai}^2}{s^2 + f_i^2} + K_s}}. \quad (13)$$

根据文献[21]可知,高阶模态对于柔性负载的动力学特性影响较少,可以忽略二阶及以上的模态.在只考虑柔性负载一阶模态时,受控对象传递函数如式(14)所示:

$$\left. \begin{aligned} G_p(s) &= \frac{\omega_m}{T_m(s)} = \frac{A'_3 s^4 + A'_2 s^2 + A'_1}{B'_3 s^5 + B'_2 s^3 + B'_1 s}, \\ A'_1 &= K_s f_1^2, \\ A'_2 &= J_1 f_1^2 + K_s, \\ A'_3 &= J_1 - F_{a1}^2, \\ B'_1 &= J_m K_s f_1^2 + K_s J_1 f_1^2, \\ B'_2 &= J_m J_1 f_1^2 + J_m K_s + K_s (J_1 - F_{a1}^2), \\ B'_3 &= J_m (J_1 - F_{a1}^2). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中: $G_p(s)$ 代表只考虑柔性负载一阶模态的受控对象的实际传递函数; $A'_1, A'_2, A'_3, B'_1, B'_2, B'_3$ 为实际传递函数系数.

为解决外界未知干扰影响双柔性伺服驱动

系统输出精度的问题,本文在文献[13]的基础上加入观测器用以提高系统控制精度.通过观测器将电机端的外部干扰力矩和被控对象参数时变特性引起的差异观测出来,然后在控制中引入等效的补偿,保证受控对象能够满足鲁棒稳定性.基于名义模型的干扰观测器的双柔性伺服驱动系统速度环控制回路如图3所示.图3中, K_p 和 K_i 表示PI控制器参数; u 表示控制器输出; d 表示外界等效干扰; \hat{y} 表示干扰观测器输出; \hat{d} 表示观测干扰; ξ 表示测量噪声; $Q(s)$ 表示低通滤波器; $G_n(s)$ 表示名义传递函数,其表达式如式(15)所示:

$$\left. \begin{aligned}
 G_n(s) &= \frac{\hat{\omega}_m}{\hat{T}_m(s)} = \frac{\hat{A}'_3 s^4 + \hat{A}'_2 s^2 + \hat{A}'_1}{\hat{B}'_3 s^5 + \hat{B}'_2 s^3 + \hat{B}'_1 s}, \\
 \hat{A}'_1 &= K_s \hat{f}_1^2, \\
 \hat{A}'_2 &= \hat{J}_1 \hat{f}_1^2 + K_s, \\
 \hat{A}'_3 &= \hat{J}_1 - \hat{F}_{a1}^2, \\
 \hat{B}'_1 &= J_m K_s \hat{f}_1^2 + K_s \hat{J}_1 \hat{f}_1^2, \\
 \hat{B}'_2 &= J_m \hat{J}_1 \hat{f}_1^2 + J_m K_s + K_s (\hat{J}_1 - \hat{F}_{a1}^2), \\
 \hat{B}'_3 &= J_m (\hat{J}_1 - \hat{F}_{a1}^2).
 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中: \hat{J}_1 表示柔性负载转动惯量的估计值; \hat{f}_1 表示柔性负载一阶模态频率估计值; \hat{F}_{a1} 表示柔性负载

一阶模态耦合系数估计值; $\hat{A}'_1, \hat{A}'_2, \hat{A}'_3, \hat{B}'_1, \hat{B}'_2, \hat{B}'_3$ 为名义传递函数系数.

双柔性伺服驱动系统的鲁棒性由两方面因素引起:一方面是长度可变的柔性机械臂的复合运动使柔性负载的参数具有时变特性,引起实际被控模型的参数扰动;另一方面是电机在转动中存在着非线性的摩擦力矩作为干扰输入系统.

假设由于双柔性伺服驱动系统的时变特性所引起的模型的不确定性能够用乘积扰动描述,名义模型与实际模型的关系如式(16)所示:

$$G_p(s) = G_n(s)(1 + \Delta(s)). \quad (16)$$

其中, $\Delta(s)$ 表示在频域内实际模型对名义模型的扰动.

干扰观测器中的低通滤波器应同时满足在参数扰动和外界干扰条件下的稳定性.双柔性伺服驱动系统的鲁棒性分析框图如图4所示.

根据图4可以得到整个闭环系统关于参数扰动的补灵敏度函数 $T(s)$,如式(17)所示:

$$T(s) = \frac{C(s)G_n(s) + Q(s)}{1 + C(s)G_n(s)} = \frac{C(s)G_n(s) + T_{DOB}(s)}{1 + C(s)G_n(s)}. \quad (17)$$

其中: $T_{DOB}(s)$ 为干扰观测器内环的补灵敏度函数; $C(s)$ 表示控制器拉普拉斯变换函数.

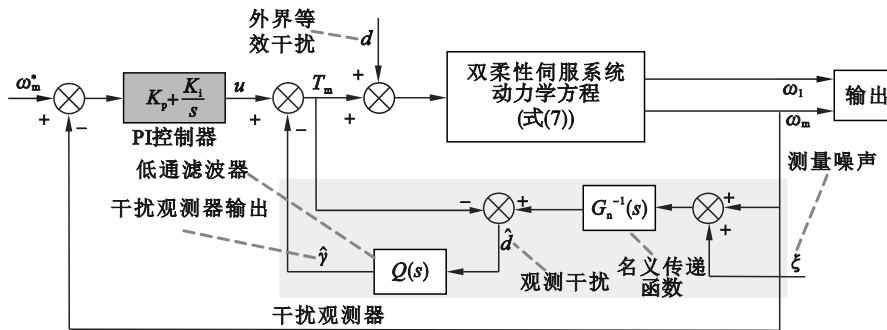


图3 基于干扰观测器的双柔性伺服驱动系统速度控制回路

Fig. 3 Speed control loop of the dual-flexible servo drive system based on the disturbance observer

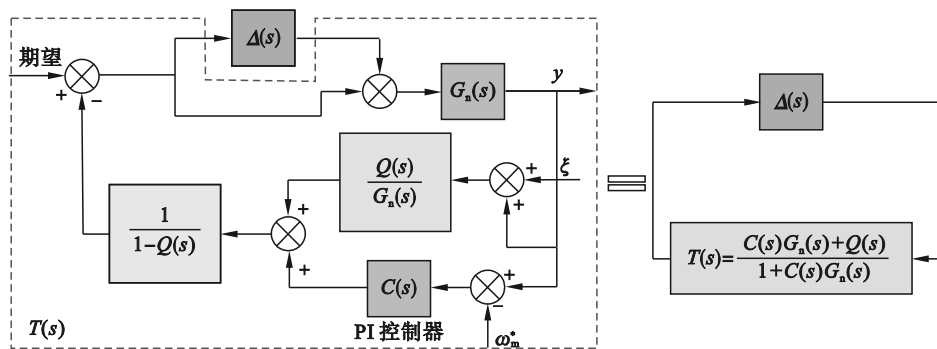


图4 双柔性伺服驱动系统的鲁棒性分析框图

Fig. 4 Block diagram of robustness analysis of the dual-flexible servo drive system

根据式(17),可得到 $T_{DOB}(s)$ 的表达式,如式(18)所示:

$$T_{DOB}(s) = Q(s). \quad (18)$$

根据文献[19],系统鲁棒稳定性的充分必要条件如式(19)所示:

$$\|\Delta(j\omega)T_{DOB}(j\omega)\|_{\infty} = \|\Delta(j\omega)Q(j\omega)\|_{\infty} \leq 1. \quad (19)$$

对式(19)进行变形,可得到式(20).若低通滤波器的设计满足式(20),则可以保证系统稳定.

$$\|Q(j\omega)\|_{\infty} \leq \frac{1}{\|\Delta(j\omega)\|_{\infty}} = \frac{1}{\left\| \frac{G_p(j\omega) - G_n(j\omega)}{G_n(j\omega)} \right\|_{\infty}}. \quad (20)$$

根据文献[3]低通滤波器可以写成如式(21)所示的形式.通过调整系数,可以使低通滤波器满足式(21),保证系统获得稳定性.

$$Q(s) = \frac{\alpha\beta\chi}{(s+\alpha)(s+\beta)(s+\chi)}. \quad (21)$$

其中, α, β, χ 是待设计参数.

低通滤波器的伯德图如图5所示.通过图5可知,低通滤波器满足式(21),能够保证双柔性伺服驱动系统的稳定.

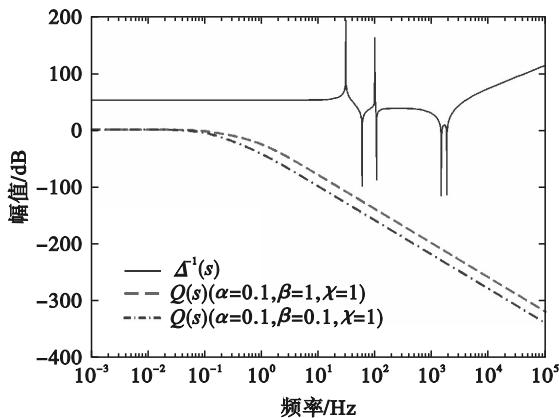


图5 低通滤波器的伯德图

Fig. 5 Bode diagram of low pass filter

3 数值仿真分析

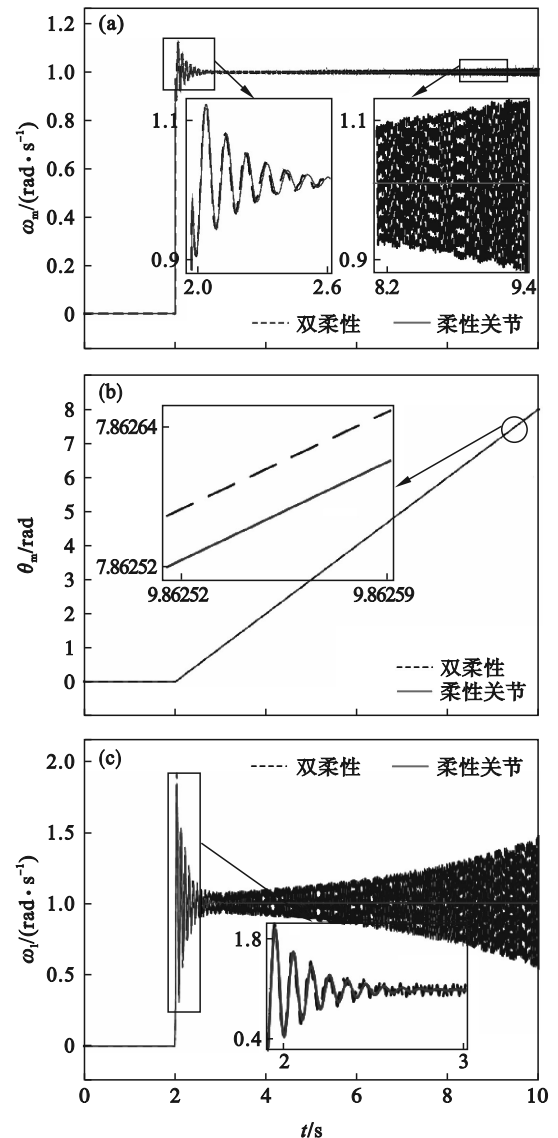
为研究基于PI控制策略的变长度柔性机械臂伺服驱动系统的控制特性,本文分析负载长度为0.5 m(工况1)和0.8 m(工况2)两种不同工况下柔性负载在复合运动过程中系统电机端和负载端的转速输出.两种工况下系统参数如表1所示.

为研究负载柔性对于伺服驱动系统的影响,本文选择柔性负载处于工况1下的参数进行数值仿真分析.本文采用单位阶跃信号作为系统的额定输入,表征理想情况下电机端期望获得的输出

转速.在不考虑外界干扰和模型参数摄动的情况下,得到双柔性伺服驱动系统电机端和负载端的转速和位移输出结果,仿真结果如图6所示.

表1 变长度柔性机械臂的参数
Table 1 Parameters of the variable-length flexible manipulator

参数	工况1	工况2
柔性负载长度 l/m	0.5	0.8
柔性负载质量 m/kg	1	1
柔性负载抗弯刚度 $EI/(kg \cdot m^2)$	1 000	1 000
柔性负载线密度 $\rho A/(kg \cdot m^{-1})$	2	1.25
柔性负载转动惯量 $J_r/(kg \cdot m^2)$	0.083 3	0.213 3
柔性负载一阶模态耦合系数 $F_{a1}/(kg^{0.5} \cdot m)$	0.284 4	0.455 0
柔性负载角速度 $\omega_l/(rad \cdot s^{-1})$	314.447 1	155.370 1
柔性负载一阶模态特征根值 β_1	3.75	2.343 8
电机端转动惯量 $J_m/(kg \cdot m^2)$	0.04	0.04
柔性关节扭转刚度 $K_s/(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	400	400



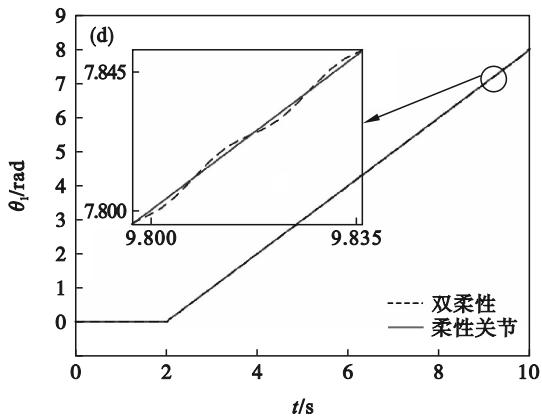


图6 双柔性对于伺服驱动系统影响的仿真结果
Fig. 6 Simulation results of the influence of dual-flexibility on the servo drive system
(a)一电机端转速; (b)一电机端转角;
(c)一负载端转速; (d)一负载端转角.

通过图6可知:负载的柔性导致伺服驱动系统的电机端和负载端的输出转速发生波动,负载端输出转速的波动尤其明显.这种转速的波动随

着时间的增加而逐渐增大.本文仿真所得结论与文献[12]仿真所得结论一致.但系统输出转速的波动并未导致电机端和负载端转角发生强烈的波动.相比较于电机端转角的波动,负载转角波动得更为明显.由此可以得出:柔性负载相较于刚性负载更易引起输出转速的波动.这种现象为伺服驱动系统的转速控制带来困难.

柔性负载的复合运动会引起伺服驱动系统的参数发生改变,由此导致双柔性伺服驱动系统的参数具有时变特性.这种系统参数的时变特性会增加系统的鲁棒性,为控制带来难度.柔性负载进行复合运动的过程中,若控制器使用相同的系数则无法保证系统获得稳定的转速输出.本文在柔性负载处于不同长度的工况下进行伺服驱动系统转速控制的数值仿真分析,分别按照工况1和工况2的系统参数对双柔性伺服驱动系统进行转速控制仿真,仿真结果如图7所示.

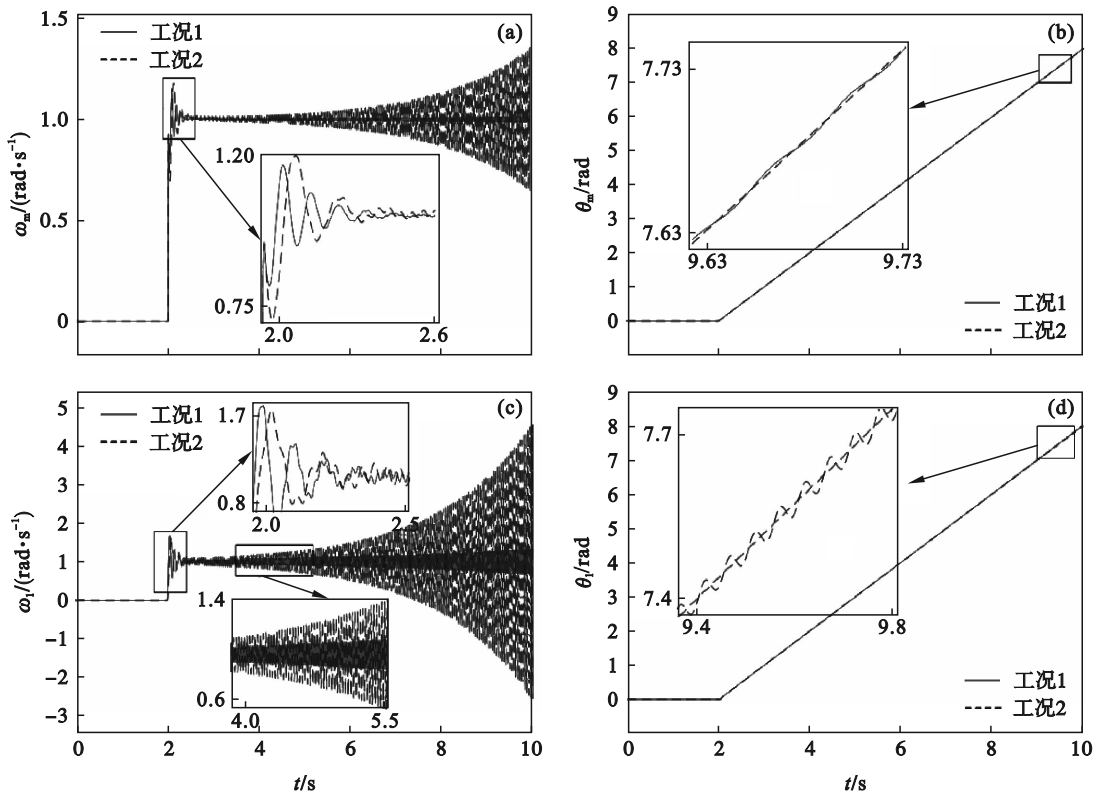


图7 不同工况下双柔性伺服驱动系统转速和转角仿真结果

Fig. 7 Simulation results of rotation speed and rotation angle of the dual-flexible servo drive system under different conditions
(a)一电机端转速; (b)一电机端转角; (c)一负载端转速; (d)一负载端转角.

由图7可知:在控制器参数相同的情况下,只能保证柔性负载处于工况1情况下双柔性伺服驱动系统输出转速的稳定性.同一控制器参数无法同时保证柔性负载处于不同位姿下的输出稳定性,并且随着柔性负载长度的增加,系统输出转

速的波动增大.在柔性负载处于工况2下,系统负载端的转速输出逐渐由收敛过渡到发散.并且负载端的转角输出的波动程度明显增大.由此说明,随着柔性负载长度的增加,系统的转速和转角的波动程度增加.

传动轴、电机等部件在转动中存在着摩擦力矩,其作为外界干扰输入到双柔性伺服驱动系统中,由此会导致系统的实际输出与理论输出之间存在差异.为了解决外界干扰对于系统的影响,本文在PI控制的基础上加入干扰观测器,对外界干扰进行观测和补偿.在柔性负载处于工况1的情况下,开展基于干扰观测器的控制策略的双柔性伺服驱动系统仿真分析.电机端的期望转速(单位正弦信号)作为双柔性伺服驱动系统的输入进入系统,并与电机端的实际转速比较后以误差的形式进入PI控制器.PI控制器产生的力矩与

外界模拟的干扰力矩和经过干扰观测器的补偿力矩加和运算后等效为电磁驱动力矩.

电磁驱动力矩进入系统,驱动电机端和负载端转动.柔性负载端的转角作为输出,电机端的实际转速作为反馈和观测器的输入信号.电机端的实际转速经过名义传递函数和低通滤波器后形成观测器输出的外界干扰力矩.通过仿真可以得到在干扰力矩下基于PI控制的含有干扰观测器的双柔性伺服驱动系统输出结果,如图8所示.根据图8可以得出,观测器可以有效减少系统在干扰力矩作用下的误差,利于提高伺服驱动系统控制精度.

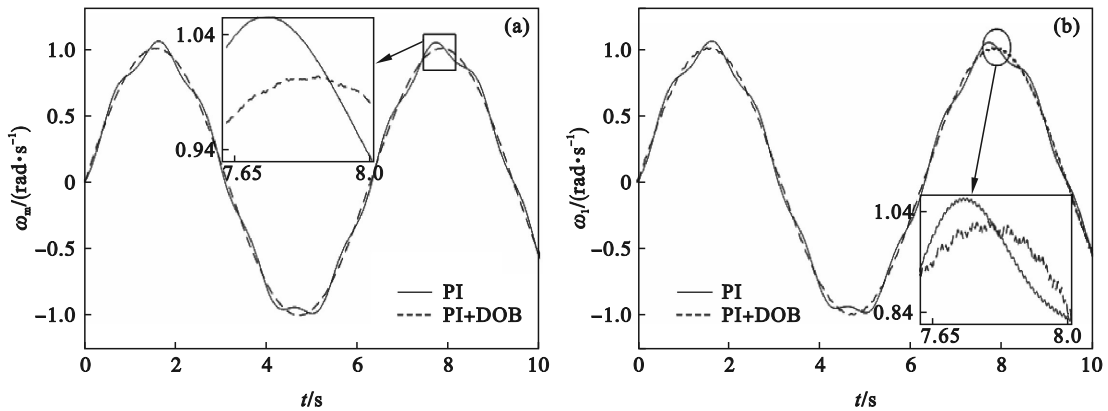


图8 不同控制策略下双柔性伺服驱动系统的转速输出仿真结果

Fig. 8 Simulation results of output rotational speed of the dual-flexible servo drive system under different control strategies

(a)—电机端转速; (b)—负载端转速.

4 控制实验

为验证本文所提出的基于干扰观测器的PI

控制策略的有效性,搭建了变长度柔性机械臂伺服驱动系统实验平台,如图9所示.

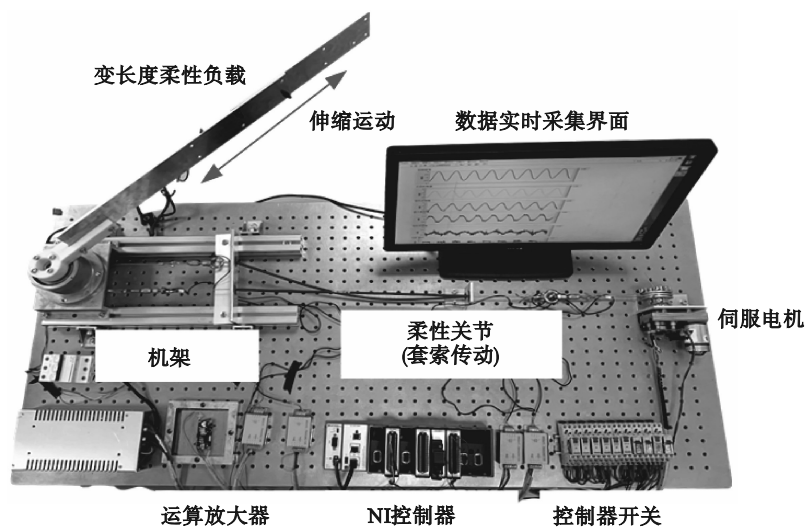


图9 变长度柔性机械臂伺服驱动系统实验平台

Fig. 9 Experimental platform of the servo drive system with the variable-length flexible manipulator

该实验平台通过套索将伺服电机产生的驱动力矩传递到柔性负载,驱动柔性负载转动.套索在

传动力矩的过程中具有柔性,并且发生变形导致传动误差.因此基于套索传动力矩的方式可以等

效为柔性关节.套索在运动过程中产生的摩擦力矩可等效为外界干扰力矩.实验平台的控制系统是基于 LabView 软件进行的实时控制^[23],实验平台的控制程序通过上位机由 LabView 软件进行编写.通过接口将程序下载到下位机发出指令,实验平台采用 NI-Crio-9053 作为下位机.通过编码器采集电机端和负载端的转角变化信号,经处理后传入 NI-9401 数据采集模块.电机控制信号由 NI-9264 模块输出到电机驱动器,控制电机驱动力矩.通过柔性负载连接处的螺栓位姿改变柔性

负载长度.本文选取表 1 中处于柔性负载长度不同的两种工况下的参数分别作为等效柔性梁的参数.通过 2 个相同质量不同长度的柔性梁模拟柔性负载位于工况 1 和工况 2 情况下的控制特性.

本文将基于干扰观测器的 PI 控制策略和其他控制策略分别应用于双柔性伺服驱动系统,控制电机端输出转速.控制实验结果如图 10 所示.

通过图 10 可知,基于 PI 和干扰观测器的联合控制策略具有最小的转角误差.由此可以验证本文所提出控制策略的有效性.

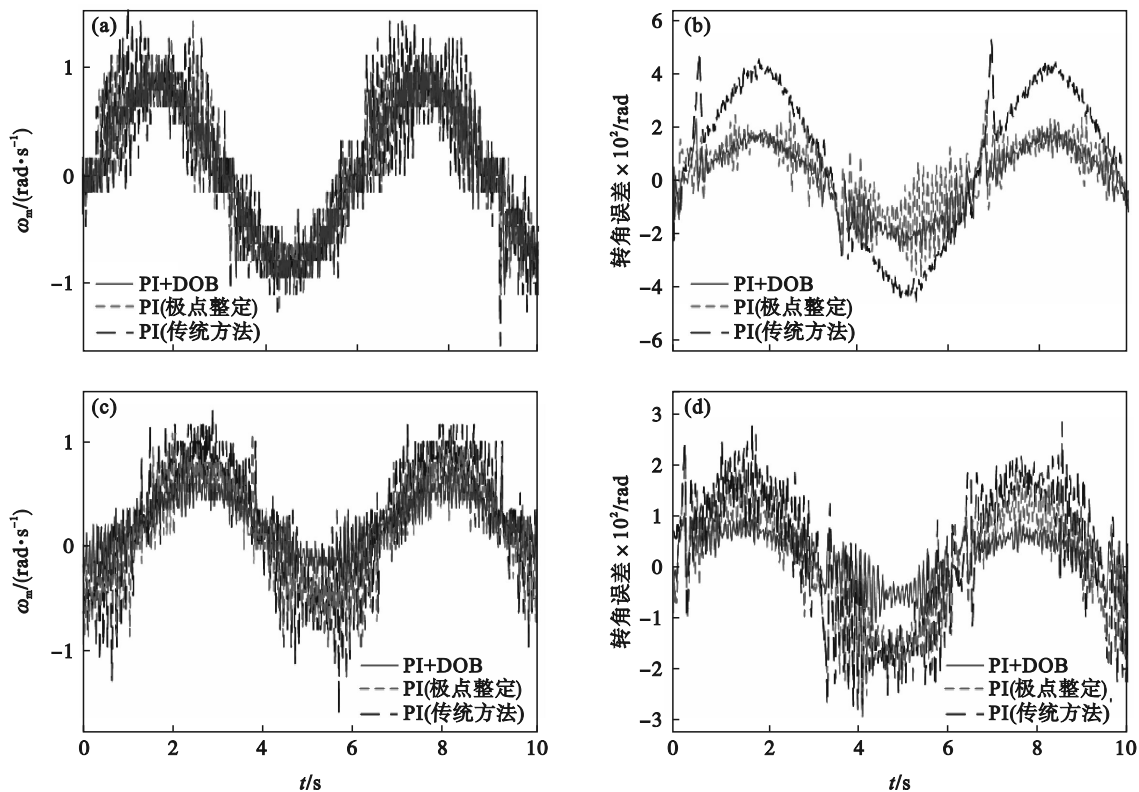


图 10 变长度柔性机械臂控制实验结果

Fig. 10 Control experiment results of the variable-length flexible manipulator

(a)—工况 1 下电机端转速; (b)—工况 1 下电机端转角误差; (c)—工况 2 下电机端转速; (d)—工况 2 下电机端转角误差.

5 结 论

1) 负载的柔性会引起伺服驱动系统的输出转速产生较大的波动.因此对于柔性机械臂的伺服驱动系统来说,应该考虑这种负载柔性的影响.

2) 具有伸缩臂的柔性机械臂在不同工况下的运动,会引起双柔性伺服驱动系统参数的时变特性.仿真结果表明:若采用固定参数对系统进行控制,则无法保证系统在每一个工况下获得稳定的转速输出.

3) 引入干扰观测器的控制策略可以减弱双柔性伺服驱动系统由于外界干扰引起的转速波

动.实验结果进一步表明采用干扰观测器的控制策略可以有效降低柔性机械臂的运动误差.

参考文献:

- [1] Shang D Y, Li X P, Yin M, et al. Control method of flexible manipulator servo system based on a combination of RBF neural network and pole placement strategy[J]. *Mathematics*, 2021, 9(8): 896–928.
- [2] Li F J, Li X P, Guo Y J, et al. Analysis of contact mechanical characteristics of flexible parts in harmonic gear reducer[J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 5521320.
- [3] Shang D Y, Li X P, Yin M, et al. Speed control method for dual-flexible manipulator with a telescopic arm considering bearing friction based on adaptive PI controller with DOB [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(6): 4741–4756.

- [4] Korayem M H, Dehkordi S F. Dynamic modeling of flexible cooperative mobile manipulator with revolute-prismatic joints for the purpose of moving common object with closed kinematic chain using the recursive Gibbs-Appell formulation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 137: 254-279.
- [5] 周优鹏, 娄军强, 陈特欢, 等. 伺服关节驱动的柔性臂系统耦合动力学模型辨识与实验[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(9): 277-284.
(Zhou You-peng, Lou Jun-qiang, Chen Te-huan, et al. Coupling dynamic modeling of a flexible manipulator driven by servo joint and test recognition [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(9): 277-284.)
- [6] Spong M W, Hutchinson S, Vidyasagar M. Robot modeling and control, second edition [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2022, 42(1): 126-128.
- [7] Nikolakopoulos G, Tzes A. Application of adaptive lattice filters for modal parameter tracking of a single flexible link carrying a shifting payload [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(5): 1338-1348.
- [8] Kumar P, Pratiher B. Nonlinear modeling and vibration analysis of a two-link flexible manipulator coupled with harmonically driven flexible joints [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 131: 278-299.
- [9] Zhao Z J, He X Y, Ahn C K. Boundary disturbance observer-based control of a vibrating single-link flexible manipulator [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(4): 2382-2390.
- [10] He W, Wang T T, He X Y, et al. Dynamical modeling and boundary vibration control of a rigid-flexible wing system [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(6): 2711-2721.
- [11] Gaultier P E, Cleghorn W L. A spatially translating and rotating beam finite element for modeling flexible manipulators [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1992, 27(4): 415-433.
- [12] Shao M Q, Huang Y M, Silberschmidt V V. Intelligent manipulator with flexible link and joint: modeling and vibration control [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 4671358.
- [13] Li X P, Shang D Y, Li H Y, et al. Resonant suppression method based on PI control for serial manipulator servo drive system [J]. *Science Progress*, 2020, 103(3): 36850420950130.
- [14] Ma L, Schilling K, Schmid C. Adaptive backstepping sliding-mode control with application to a flexible-joint manipulator [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2006, 39(16): 55-60.
- [15] Hu J, Wang P F, Xu C C, et al. High accuracy adaptive motion control for a robotic manipulator with model uncertainties based on multilayer neural network [J]. *Asian Journal of Control*, 2022, 24(3): 1503-1514.
- [16] Li W, Hori Y. Vibration suppression using single neuron-based PI fuzzy controller and fractional-order disturbance observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(1): 117-126.
- [17] Zhao Z J, Liu Z J. Finite-time convergence disturbance rejection control for a flexible Timoshenko manipulator [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(1): 157-168.
- [18] 刘乐, 蔺明浩, 李晓刚, 等. 基于模糊干扰观测器的电液伺服位置系统自适应反步控制 [J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(12): 143-150, 158.
(Liu Le, Lin Ming-hao, Li Xiao-gang, et al. Adaptive backstepping control for the electro-hydraulic servo position system based on fuzzy disturbance observers [J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(12): 143-150, 158.)
- [19] Yun J N, Su J B. Design of a disturbance observer for a two-link manipulator with flexible joints [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(2): 809-815.
- [20] 李小彭, 尚东阳, 陈仁桢, 等. 基于机械臂位姿变换的柔性负载伺服驱动系统控制策略 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(21): 56-69.
(Li Xiao-peng, Shang Dong-yang, Chen Ren-zhen, et al. Control strategy of flexible load servo drive system based on manipulator position and position transformation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(21): 56-69.)
- [21] Shang D Y, Li X P, Yin M, et al. Dynamic modeling and fuzzy compensation sliding mode control for flexible manipulator servo system [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 107: 530-556.
- [22] Chen Y Y, Yang M, Long J, et al. Analysis of oscillation frequency deviation in elastic coupling digital drive system and robust notch filter strategy [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(1): 90-101.
- [23] 尚东阳, 李小彭, 尹猛, 等. 采用RBF神经网络辨识的柔性机械臂抑振控制策略 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(6): 76-84.
(Shang Dong-yang, Li Xiao-peng, Yin Meng, et al. Vibration suppression control strategy for flexible manipulator using RBF neural network identification [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(6): 76-84.)