

模糊整定PI参数的双柔性机械臂振动抑制

李小彭¹, 周赛男¹, 刘佳琪¹, 尹猛²

(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: 机械臂伺服驱动系统中柔性因素的存在易导致机械臂输出转速波动,甚至引发系统谐振. 为抑制系统转速波动,使机械臂传动系统性能稳定,使用模糊理论整定PI控制器参数的控制策略. 根据假设模态法和拉格朗日动力学方程建立了考虑LuGre摩擦模型的双柔性机械臂传动系统动力学方程,并分析了动力学方程中耦合非线性项对系统传动特性的影响. 使用极点配置策略确定PI控制器参数的取值范围,后根据模糊规则实时调整控制器参数,以减小伺服系统输出转速的波动,进而抑制系统谐振. 最后,借助数值仿真分析和机械臂控制实验,与传统PI控制策略对比,发现本文所述控制策略可使电机端转角跟踪误差绝对值的平均值降低43.066%,柔性负载转角误差的标准差降低46.506%,更加验证了所提模糊规则整定PI控制器参数抑振方法的有效性.

关键词: 双柔性机械臂; 柔性关节; 柔性负载; 模糊整定; PI控制

中图分类号: TH 113.1; TP 13 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)02-0217-09

Vibration Suppression of Dual-Flexible Manipulator with Fuzzy Tuning PI Parameters

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

(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 existence of flexible factors in the manipulator servo drive system can easily lead to the fluctuation of the output speed of the manipulator, and even lead to system resonance. In order to suppress the speed fluctuation of the system and stabilize the performance of the manipulator's transmission system, the fuzzy theory is used to set the control strategy of PI controller parameters. According to the assumed mode method and Lagrange dynamic equation, the dynamic equation of the dual-flexible manipulator's transmission system considering LuGre friction model is established, and the influence of the coupling nonlinear terms in the dynamic equation on the transmission characteristics of the system is analyzed. The pole assignment strategy is used to determine the value range of the PI controller parameters, and then the controller parameters are adjusted in real time according to the fuzzy rules to reduce the fluctuation of the servo system output speed and further suppress the system resonance. Finally, by means of numerical simulation analysis and manipulators' control experiment, compared with the traditional PI control strategy, it is found that the control strategy taken in this study can reduce the average value of the absolute value of the motor end angle tracking error by 43.066%, and the standard deviation of the flexible load angle error by 46.506%, which further verifies the effectiveness of the proposed vibration suppression method with fuzzy tuning PI controller parameters.

Key words: dual-flexible manipulator; flexible joint; flexible load; fuzzy tuning; PI control

在机械臂传动系统中,柔性常体现在两方面:一是存在于传动关节之间的柔性,通常由机械臂传动机构或关节转轴的扭曲变形造成,称为关节间的传动柔性,常见于驱动器与负载间传递

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875092); 宁夏自然科学基金资助项目(2020AAC03279).

作者简介: 李小彭(1976-),男,江西宁都人,东北大学教授,博士生导师.

旋转运动的齿轮、联轴器等;另一方面是由于柔性机械臂自身结构模态阻尼小,运动过程中导致机械臂(即长连杆)的弹性变形,将机械臂看作系统的负载端,称其为具有柔性的负载.将含有关节传动柔性和柔性负载的机械臂伺服驱动系统定义为双柔性机械臂传动系统^[1].

因耗能低、结构紧凑,柔性机械臂广泛应用于工业装配、航空航天、医疗辅助等领域.但因存在柔性,实际工况中不可避免会产生扭曲、弹性形变等,这易引发机械谐振,影响系统动态精度,甚至损坏机械臂^[2].但因其强耦合、高度非线性的特性,对其进行精确动力学描述是相当困难的.通常需要根据工况要求及功能实现将其等效简化.

Spong^[3]首先提出用两质量系统表征关节间的柔性,将电机与负载间的柔性传动关节等效为小阻尼弹簧.文献[4]将巡检机器人传动轴系等效成扭簧,建立了较为精确的动力学模型.研究者大多将柔性负载等效成欧拉-伯努利(Euler-Bernoulli)梁或铁木辛柯(Timoshenko)梁.文献[5]将其简化为欧拉-伯努利梁.Rezaei等^[6]基于铁木辛柯梁模型建立了考虑扭转、纵向及弯曲变形的柔性连杆机械臂动力学模型.多数研究都是将柔性关节与柔性负载二者隔离开,单独进行动力学研究,较少将二者综合起来考量.文献[7-8]综合考虑了两种柔性,将柔性关节作为柔性负载的一个特殊模态进行处理.但这种建模方法没有考虑柔性关节驱动器对系统传动的影响.

在柔性机械臂传动系统中,通过选取合适的解调器参数抑制系统谐振的PI控制是应用较为普遍的控制策略.其中,控制器的设计是抑振性能的关键,传统控制方法的实施往往需要基于被控对象精确的数学模型,而柔性机械臂模型中存在着大量不确定因素,这为控制器的设计带来了困难.智能控制的日益精进,尤其是模糊理论的发展,为其提供了新的解决办法.文献[9-10]通过模糊控制实时调节控制器参数,以实现时对变转动惯量、负载参数、柔性造成的输出转速的补偿.而且随着各种控制方法的交叉融合,复合控制逐渐热门.文献[11]使用模糊小波神经网络逼近系统的不确定项,研究了一种自适应分数阶非奇异终端滑模控制策略.虽然各种控制方法层出不穷,但更精准的动力学模型、更高效的控制策略或者是基于无模型、数据驱动的控制方法仍然

是待以攻克的难题.

本文综合柔性关节、柔性负载、电机端摩擦力矩三种因素,建立了更逼近实际工况的双柔性机械臂传动系统动力学方程,为控制策略的实施搭建了更精确的数学模型;此外,使用极点配置策略合理选择控制器参数范围,为运用模糊规则提供依据,达到实时调节控制器参数变化的目的.最后,借助数值仿真分析和机械臂控制实验,与传统PI控制策略对比,验证了本文所提出的模糊规则整定PI控制器参数抑振方法的有效性.

1 双柔性机械臂伺服系统建模

为便于系统建模,柔性关节等效为小阻尼弹簧;柔性负载等效为 Euler-Bernoulli 梁,只考虑横向振动,忽略纵向振动和变形,且不计外力的作用.简化后的机械臂传动系统如图 1 所示, XOY 表示静态坐标系, x_0Oy_0 表示随动坐标系.双柔性机械臂传动系统符号如表 1 所示.

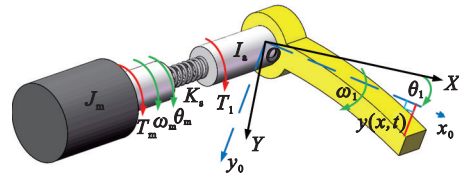


图 1 具有柔性负载的柔性关节伺服驱动系统模型图
Fig. 1 Model diagram of the flexible joint servo drive system with flexible load

表 1 系统参数
Table 1 System parameters

参数	名称	参数	名称
$J_m/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	电机转动惯量	θ_m/rad	电机转角
$I_l/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	负载转动惯量	θ_l/rad	负载转角
$T_m/(\text{N}\cdot\text{m})$	电机电磁转矩	$\omega_m/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	电机角速度
$T_l/(\text{N}\cdot\text{m})$	负载转矩	$\omega_l/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	负载角速度
$K_s/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	传动系统 扭转刚度	$y(x,t)/\text{m}$	负载变形量

根据梁的振动基础知识,柔性负载横向振动位移 $y(x,t)$ 的数学表达式为

$$\rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right] = 0. \quad (1)$$

其中: x 为柔性负载上任意位置处的横坐标; ρ 为密度; A 为横截面积; $y(x,t)$ 为柔性负载的横向位移; E 表示弹性模量; I 表示截面惯性矩; EI 表示抗弯刚度.

采用假设模态法,则柔性负载在任意位置 x 处的变形为

$$\left. \begin{aligned} y(x,t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) \delta_i(t) = \boldsymbol{\phi}^T \boldsymbol{\delta}, \\ \phi_i(x) &= W_1 \sin \beta_i x + W_2 \cos \beta_i x + \\ &W_3 \sinh \beta_i x + W_4 \cosh \beta_i x, \\ \delta_i(t) &= D \sin(\omega_i t + \varphi), \\ \omega_i &= \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中: $\phi_i(x)$ 是模态函数; $\delta_i(t)$ 是模态坐标; ω_i 表示第 i 阶模态频率; W_1, W_2, W_3, W_4 可通过悬臂梁的边界条件求得; D 表示梁振动的最大幅值, 可通过初始条件求得.

柔性负载上任意一点的向量表示为

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

传动系统的总动能, 总势能都可以看作是电机、柔性关节和柔性负载各部分的动能、势能之和:

$$T = T_m + T_k + T_1, \quad (4)$$

$$V = V_m + V_k + V_1. \quad (5)$$

其中: T, V 分别为双柔性伺服驱动系统的总动能和总势能; T_m, V_m 分别为电机的动能和势能, $T_m = \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2, V_m = 0$; T_k, V_k 分别为柔性关节的动能和弹性势能, $T_k = 0, V_k = \frac{1}{2} K_s (\theta_1 - \theta_m)^2$; T_1, V_1 分别为柔性负载的动能和弹性势能, $T_1 = \frac{1}{2} \rho A \int_0^l \dot{\boldsymbol{r}}^T \dot{\boldsymbol{r}} dx, V_1 = \frac{1}{2} EI \int_0^l \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} dx$.

根据拉格朗日动力学方程, 整理得到如下形式:

$$\left. \begin{aligned} J_m \ddot{\theta}_m - K_s (\theta_1 - \theta_m) &= T_m, \\ \ddot{\theta}_1 I_a + \ddot{\theta}_1 \sum_{i=1}^{\infty} \delta_i(t)^2 + 2\dot{\theta}_1 \sum_{i=1}^{\infty} \delta_i(t) \dot{\delta}_i(t) + \\ \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{\delta}_i(t) \int_0^l \rho A x \phi_i(x) dx + K_s (\theta_1 - \theta_m) &= -T_1, \\ \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{\delta}_i(t) + \ddot{\theta}_1 \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \rho A x \phi_i(x) dx - \\ \dot{\theta}_1^2 \sum_{i=1}^{\infty} \delta_i(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \omega_i^2 \delta_i(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

实际系统中, 高阶模态不易被激发, 因此常取前 n 阶模态进行研究^[12], 定义如下变量:

$$F_i = \int_0^l \rho A x \phi_i(x) dx, \quad (7)$$

$$\Omega^2 = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2). \quad (8)$$

则双柔性机械臂传动系统的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} J_m \ddot{\theta}_m - K_s (\theta_1 - \theta_m) &= T_m, \\ \ddot{\theta}_1 I_a + \ddot{\theta}_1 \sum_{i=1}^n \delta_i(t)^2 + 2\dot{\theta}_1 \sum_{i=1}^n \delta_i(t) \dot{\delta}_i(t) + \\ \sum_{i=1}^n \ddot{\delta}_i(t) F_{ai} + K_s (\theta_1 - \theta_m) &= -T_1, \\ \sum_{i=1}^n \ddot{\delta}_i(t) + \ddot{\theta}_1 \sum_{i=1}^n F_{ai} - \dot{\theta}_1^2 \sum_{i=1}^n \delta_i(t) + \\ \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \delta_i(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在式(9)基础上, 考虑双柔性机械臂伺服驱动系统中的摩擦因素, 摩擦力矩可以用 LuGre 模型^[13]描述, 如式(10)所示.

$$\left. \begin{aligned} M_f &= \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{\theta}_m, \\ \dot{z} &= \dot{\theta}_m - \sigma_0 \frac{|\dot{\theta}_m|}{g(\dot{\theta}_m)} z, \\ g(\dot{\theta}_m) &= M_c + (M_s - M_c) \exp \left[- \left| \frac{\dot{\theta}_m}{\theta_s} \right|^2 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中: z 表示接触面鬃毛的平均变形; σ_0 表示摩擦刚性系数; σ_1 表示摩擦阻尼系数; σ_2 表示黏性摩擦系数; M_c 表示库伦摩擦力矩; M_s 表示静摩擦力矩; θ_s 表示 Stribeck 速度.

若忽略负载转角和模态坐标耦合的非线性项, 则考虑 LuGre 摩擦模型的双柔性机械臂伺服系统的动力学方程如式(11)所示.

$$\left. \begin{aligned} J_m \ddot{\theta}_m - K_s (\theta_1 - \theta_m) &= T_m - M_f, \\ \ddot{\theta}_1 I_a + \sum_{i=1}^n \ddot{\delta}_i(t) F_{ai} + K_s (\theta_1 - \theta_m) &= -T_1, \\ \sum_{i=1}^n \ddot{\delta}_i(t) + \ddot{\theta}_1 \sum_{i=1}^n F_{ai} + \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \delta_i(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

根据式(11), 双柔性机械臂伺服驱动系统电机转速和电磁转矩, 负载转速和电磁转矩之间的传递函数为

$$\frac{\omega_m(s)}{T_m(s)} = \frac{s}{s^2 J_m + K_s - \frac{K_s^2}{s^2 I_a - \sum_{i=1}^n \frac{s^4 F_i^2}{s^2 + \omega_i^2} + K_s}}, \quad (12)$$

$$\frac{\omega_1(s)}{T_m(s)} = \frac{s K_s}{(s^2 J_m + K_s) \left(s^2 I_a - \sum_{i=1}^n \frac{s^4 F_i^2}{s^2 + \omega_i^2} + K_s \right) - K_s^2}. \quad (13)$$

2 耦合非线性项分析

为了研究耦合非线性项对于双柔性伺服系统的影响, 选择 Damaren 提出的单杆演算法作为柔性负载转角和时间的变化函数^[14], 其表达式如

式(14)所示.

$$\ddot{\theta}_1(t) = \begin{cases} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{15} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{15}t\right) \right), & 0 \leq t \leq 15; \\ 0, & t > 15. \end{cases} \quad (14)$$

本文选择从柔性负载变形的角度阐释非线性项的影响. 分析机械臂的长度、柔性负载的抗弯刚度对于柔性负载末端变形的影响. 根据式(9)~式(11)可得到考虑一维变形(含耦合非线性项)、忽略耦合非线性项情况下柔性负载的末端变形,如图2所示.

根据图2可知,在柔性负载长度较小且抗弯

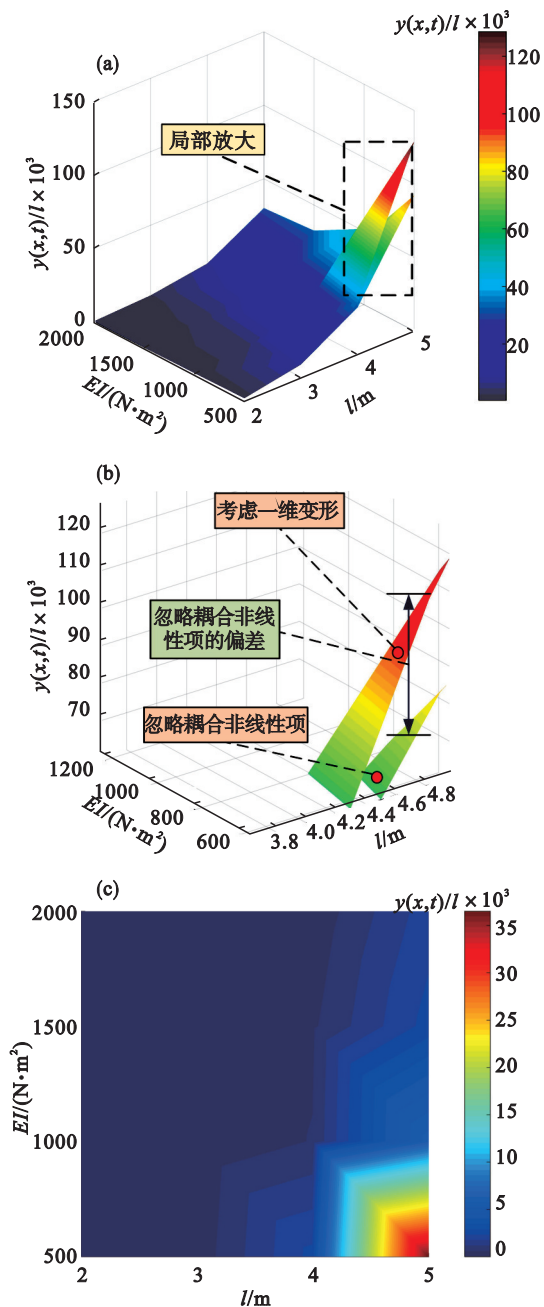


图2 柔性负载的末端变形

Fig. 2 End deformation of flexible load

- (a) 柔性负载的末端变形分布图;
- (b) (a)的局部放大图;
- (c) 一维变形和忽略耦合非线性项之间的偏差.

刚度较大的情况下,耦合非线性项对于机械臂的单位变形量影响不大. 但在机械臂长度较长且抗弯刚度较小的情况下,耦合非线性项对于机械臂的单位变形量有很大的影响. 因此在大多数情况下可以忽略耦合非线性项的影响.

根据上述分析可知:在双柔性机械臂传动系统中,转角和模态坐标耦合的非线性项对动力学方程的影响很小,所以可以忽略不计. 对双柔性伺服驱动系统,忽略耦合非线性项,且只考虑一阶模态,则驱动器转速与电磁转矩间的传递函数为

$$\frac{\omega_m(s)}{T_m(s)} = \frac{s}{s^2 J_m + K_s - \frac{K_s^2}{(s^2 I_a - \frac{s^4 F_1^2}{(s^2 + \omega_1^2)} + K_s)}}. \quad (15)$$

对式(15)进行化简后有

$$\frac{\omega_m(s)}{T_m(s)} = \frac{A'_3 s^5 + A'_2 s^3 + A'_1 s}{B'_3 s^6 + B'_2 s^4 + B'_1 s^2}. \quad (16)$$

其中: $A'_1 = K_s \omega_1^2$; $A'_2 = I_a \omega_1^2 + K_s$; $A'_3 = I_a - F_1^2$; $B'_1 = J_m K_s \omega_1^2 + K_s I_a \omega_1^2$; $B'_2 = J_m I_a \omega_1^2 + J_m K_s + K_s (I_a - F_1^2)$; $B'_3 = J_m (I_a - F_1^2)$.

3 模糊规则整定PI参数控制策略

对双柔性机械臂伺服驱动系统,采用PI控制策略,即使用PI调节器,则控制系统框图如图3所示.

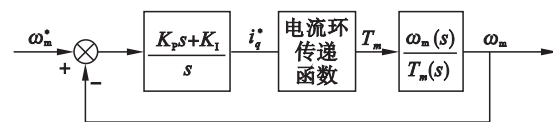


图3 PI控制策略系统框图

Fig. 3 Block diagram of PI control strategy system

采用模糊规则整定控制器参数的PI控制策略对双柔性伺服驱动系统转速进行控制. 通过模糊规则实现PI控制器参数的实时调整,进而减弱摩擦力矩、外界干扰等不确定项对系统输出转速的影响.

3.1 极点配置确定控制器参数取值范围

使用模糊控制策略之前需要大致确定控制器参数的取值范围. 使用极点配置策略,通过调整极点参数确定控制器参数的大致范围^[8]. 为方便控制器参数范围的确定,需要对双柔性机械臂伺服驱动系统进行降阶处理. 使用Pade方法,降阶后的传递函数如式(17)所示.

$$G_n(s) = \frac{\hat{\omega}_m(s)}{\hat{T}_m(s)} = \frac{s^2 + \alpha}{\beta s^3 + \gamma s}. \quad (17)$$

其中, α, β, γ 表示降阶后传递函数的系数.

双柔性机械臂伺服驱动系统闭环传递函数如式(18)所示.

$$G_b(s) = \frac{\left(K_p + \frac{K_I}{s}\right) \left(\frac{s^2 + \alpha}{\beta s^3 + \gamma s}\right)}{1 + \left(K_p + \frac{K_I}{s}\right) \left(\frac{s^2 + \alpha}{\beta s^3 + \gamma s}\right)} = \frac{K_p s^3 + K_I s^2 + K_p \alpha s + K_I \alpha}{\beta s^4 + K_p s^3 + (K_I + \gamma) s^2 + K_p \alpha s + K_I \alpha}. \quad (18)$$

其中, K_p 和 K_I 表示 PI 控制器的系数.

采用极点配置的方法, 可以得到式(19).

$$\left. \begin{aligned} \beta s^4 + K_p s^3 + (K_I + \gamma) s^2 + K_p \alpha s + K_I \alpha &= \beta D, \\ D &= (s^2 + 2\zeta_1 \omega_{a1} s + \omega_{a1}^2)(s^2 + 2\zeta_2 \omega_{b1} s + \omega_{b1}^2). \end{aligned} \right\} (19)$$

其中: ζ_1 和 ζ_2 表示极点阻尼系数; ω_{a1} 和 ω_{b1} 表示极点自然频率.

根据式(19), 可得 PI 控制器的参数表达式:

$$\left. \begin{aligned} K_p &= (2\zeta_1 \omega_{a1} + 2\zeta_2 \omega_{b1}) \beta, \\ K_I &= \frac{\omega_{a1}^2 \omega_{b1}^2 \beta}{\alpha}. \end{aligned} \right\} (20)$$

使用相同极点阻尼系数的极点配置方法, 即 $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta$, 可得式(21).

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega_{a1} \omega_{b1}^2 + \omega_{b1} \omega_{a1}^2}{\omega_{a1} + \omega_{b1}} &= \alpha, \\ 4\zeta^2 \omega_{a1} \omega_{b1} + \omega_{a1}^2 + \omega_{b1}^2 &= \frac{1}{\alpha} \omega_{a1}^2 \omega_{b1}^2 + \frac{\gamma}{\beta}. \end{aligned} \right\} (21)$$

整理式(21)可得到式(22).

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\omega_{a1}}{\sqrt{\alpha}} + \frac{\sqrt{\alpha}}{\omega_{a1}}\right)^2 - 2 &= 1 + \frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2, \\ \left(\frac{\omega_{a1}}{\sqrt{\alpha}} - \frac{\sqrt{\alpha}}{\omega_{a1}}\right)^2 + 2 &= 1 + \frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2, \\ \left(\frac{\omega_{b1}}{\sqrt{\alpha}} + \frac{\sqrt{\alpha}}{\omega_{b1}}\right)^2 - 2 &= 1 + \frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2, \\ \left(\frac{\omega_{b1}}{\sqrt{\alpha}} - \frac{\sqrt{\alpha}}{\omega_{b1}}\right)^2 + 2 &= 1 + \frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2. \end{aligned} \right\} (22)$$

由此求得 ω_{a1}, ω_{b1} 的表达式:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{a1} &= \frac{\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2 + 3} + \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2 - 1}}{2} \sqrt{\alpha}, \\ \omega_{b1} &= \frac{\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2 + 3} - \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2 - 1}}{2} \sqrt{\alpha}. \end{aligned} \right\} (23)$$

因此 PI 控制器的参数如式(24)所示.

$$\left. \begin{aligned} K_p &= 2\zeta\beta \sqrt{\alpha \left(3 + \frac{\gamma}{\alpha\beta} - 4\zeta^2\right)}, \\ K_I &= \alpha\beta. \end{aligned} \right\} (24)$$

通过调整式(24)中的极点阻尼系数可以确定 PI 控制器的最优参数. 根据受控对象的传递函数确定控制器参数范围. 根据 $G_{n1}(s)$ 确定出初始状态下最优的 PI 控制器参数. 此时的最优 PI 控制参数定义为 K_{p1} 和 K_{I1} . 同理, 根据 $G_{n2}(s)$ 可以获得终止状态下最优的 PI 控制器参数 K_{p2} 和 K_{I2} . 根据 K_{p1}, K_{I1}, K_{p2} 和 K_{I2} 可以获得控制器参数的变化范围, 为使用模糊控制策略做准备.

3.2 模糊规则整定 PI 控制器参数

采用双输入-双输出系统, 误差(e)和误差变化率(ec)是系统输入, $\Delta k_p, \Delta k_i$ 是模糊规则的输出. $e, ec, \Delta k_p, \Delta k_i$ 对应的模糊语言变量分别为 $E, EC, \Delta K_p, \Delta K_i$. 模糊 PI 控制器结构如图 4 所示.

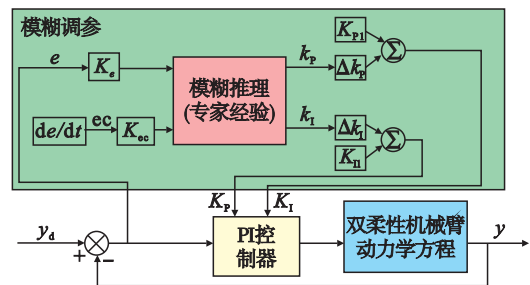


图 4 模糊 PI 控制器结构图

Fig. 4 Structure diagram of the fuzzy PI controller

设置控制器输入变量 e, ec , 输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 的论域均为 $[-6, 6]$. 据此可以求出误差, 误差变化率的量化因子, 输出控制量的比例因子.

$$\left. \begin{aligned} E &= K_e e, \\ EC &= K_{ec} ec, \\ \Delta k_p &= k_p \Delta K_p, \\ \Delta k_i &= k_i \Delta K_i. \end{aligned} \right\} (25)$$

其中: K_e 和 K_{ec} 表示 e, ec 的量化因子; k_p 和 k_i 表示 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 的比例因子.

模糊控制器输入、输出的模糊集合都设定为 7 个, 如式(26)所示.

$$E, EC, \Delta K_p, \Delta K_i = \{NB \quad NM \quad NS \quad ZO \quad PS \quad PM \quad PB\}. \quad (26)$$

其中: N 表示负; P 表示正; B 表示大; M 表示适中; S 表示小; ZO 表示 0, 即: {负大 负中 负小 零 正小 正中 正大}.

工程上用得较多的 5 种隶属度函数: 三角型, 梯型, 钟型, 高斯型, Sigmoid 型. 借鉴文献 [12], 本研究选择高斯型隶属度函数. 模糊规则

是对专家知识和实践经验的总结,根据前面的设定可设计出 49 条模糊规则,如表 2 和表 3 所示.

表 2 控制器输出参数 K_p 模糊规则

Table 2 Fuzzy rules for controller output parameter K_p

ΔK_p	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
E	ZO	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NB	NB

表 3 控制器输出参数 K_i 模糊规则

Table 3 Fuzzy rules for controller output parameter K_i

ΔK_i	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
E	ZO	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	PS	PS	PM	PB	PB

由模糊规则得到模糊推理关系,如图 5 所示.根据模糊推理关系可以确定 PI 控制器的参数,如式(27)所示.

$$\left. \begin{aligned} K_p &= K_{p1} + \Delta k_p, \\ K_i &= K_{i1} + \Delta k_i. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

4 数值仿真分析

为了验证本文提出的控制策略的效果,开展数值仿真分析.主要从双柔性机械臂的动力学特性和模糊 PI 控制效果两个方面分析.首先分析了柔性负载长度和耦合非线性项对双柔性机械臂末端变形的影响;然后通过双柔性机械臂伺服系统在自适应 PI 控制策略下的仿真结果说明本文控制策略的有效性.

4.1 双柔性机械臂伺服系统的动力学特性

为了说明耦合非线性项对于柔性负载末端变形的影响,在仿真过程中,动力学方程分别选择式(9)和式(11).其中:式(9)表示考虑一维变形的动力学方程;式(11)表示忽略耦合非线性项的动力学方程.双柔性机械臂的参数设置如表 4 所示.

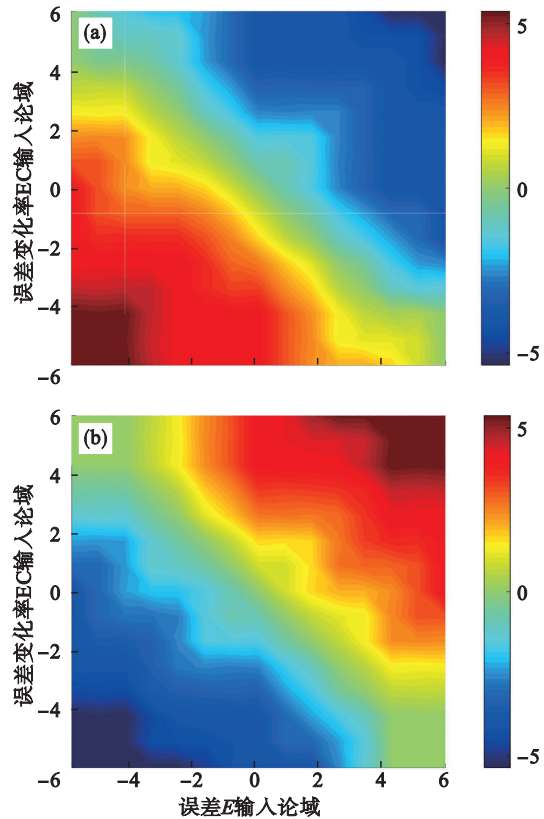


图 5 模糊推理关系

Fig. 5 Fuzzy reasoning relationship

(a)— K_p 模糊推理关系; (b)— K_i 模糊推理关系.

表 4 双柔性机械臂系统参数

Table 4 Parameters of the dual-flexible manipulator system

参数	长度 1	长度 2
l/m	1	4
m/kg	1	1
$EI/(N \cdot m^2)$	80	80
$\rho A/(kg \cdot m^{-2})$	1	0.25
$J_f/(kg \cdot m^2)$	0.333	5.333
$\omega_1/(rad \cdot s^{-1})$	17.116	11.117
β_1	1.25	0.9375
$J_m/(kg \cdot m^2)$	2	
$K_s/(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	500	
初始控制器参数	$K_{p1}=15, K_{i1}=20$	
终止控制器参数	$K_{p2}=20, K_{i2}=30$	

根据上述动力学方程可得到不同长度的双柔性机械臂末端变形量随时间的变化关系,如图 6 所示.

由图 6 可知,在长度较小的情况下,是否考虑转角和模态坐标耦合的非线性项因素对柔性负载的变形影响不大;在长度较大的情况下,非线性项对变形产生较大的影响.综合来看,机械臂的长度对柔性负载末端变形的影响随着长度的增加而逐渐加大.

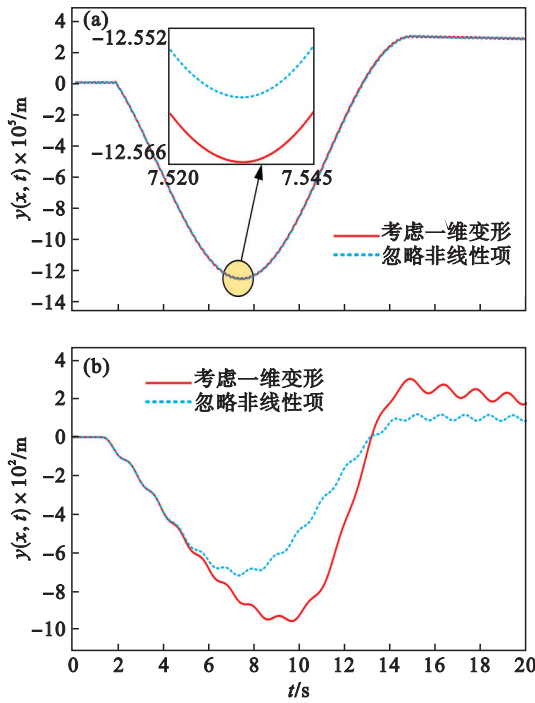


图 6 耦合非线性项和负载长度对柔性负载变形的影响
 Fig. 6 Effect of coupling nonlinearity and load length on the deformation of flexible load
 (a) 一柔性负载长度为 1 m; (b) 一柔性负载长度为 4 m.

4.2 模糊 PI 控制策略

为研究不同控制策略在不同负载长度下对双柔性机械臂的振动抑制效果,本文在双柔性机械臂两种不同长度工况下开展数值仿真实验.在不同长度工况下,分别使用基于模糊规则整定的 PI 控制策略(FCPI)和 PI 控制策略(PI)对双柔性机械臂进行控制,可得到不同控制策略的仿真结果,如图 7 所示.

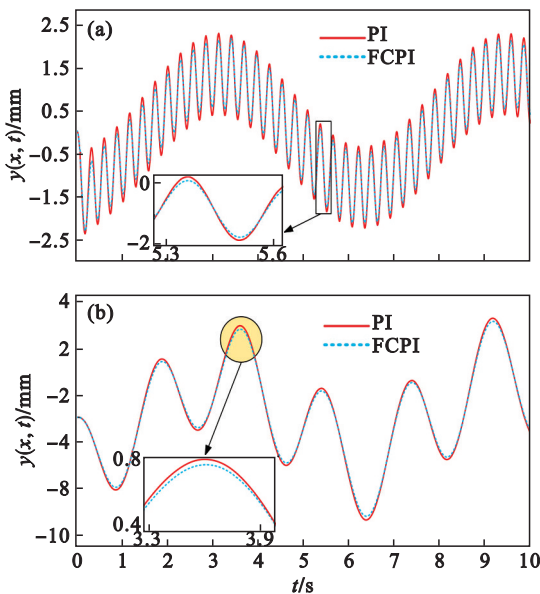


图 7 不同控制策略下柔性负载的变形
 Fig. 7 Deformation of flexible load under different control strategies
 (a) 一长度 1 下的变形; (b) 一长度 2 下的变形.

由图 7 可知,随着柔性负载长度的增加,负载具有的柔性对于伺服系统的影响逐渐加强.在两种工况下,单独使用 PI 控制策略,末端变形量出现明显的波动.但是将模糊规则联合 PI 使用的控制策略能有效减少末端变形量的波动.

此外,以电机转速、负载转速作为控制效果的评价指标,分别使用 FCPI 和 PI 控制策略对双柔性机械臂进行控制,以单位正弦函数作为额定转速输入伺服系统,进行仿真实验,结果如图 8 所示.

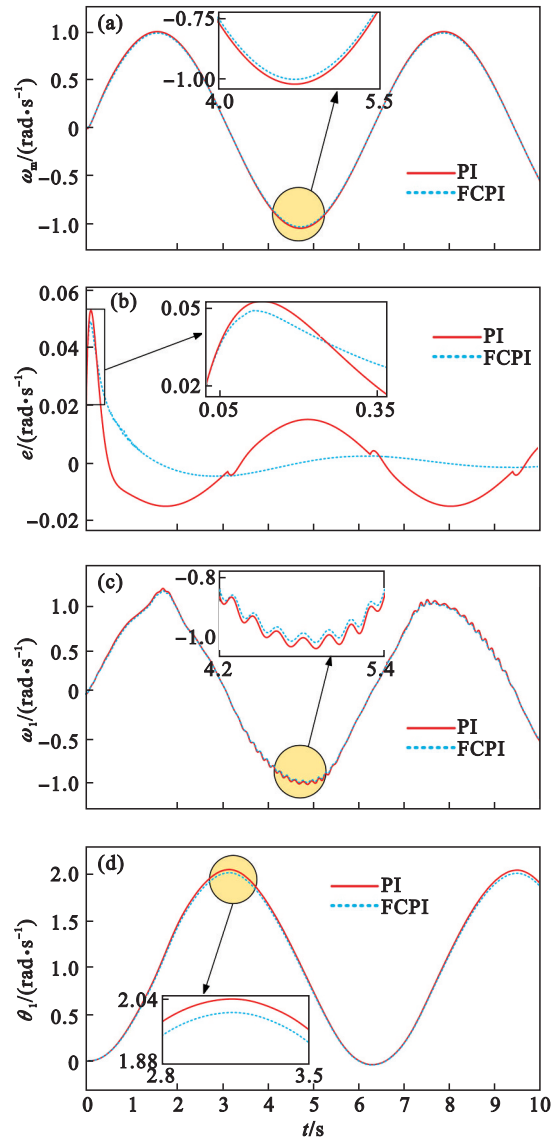


图 8 不同控制策略的仿真结果
 Fig. 8 Simulation results of different control strategies
 (a) 一电机端输出转速; (b) 一电机端转速误差;
 (c) 一柔性负载输出转速; (d) 一柔性负载输出转角.

由图 8 可知,在工况 1 情况下,采用本文提出的控制策略能够有效减小电机端、负载端输出转速的波动,并且获得更小的转速误差.这进一步表明:本文提出的控制策略,采用模糊规则实时整定 PI 控制器参数对抑制系统谐振有效.

5 控制实验

本文搭建了验证模糊规则整定 PI 参数控制策略的双柔性机械臂实验平台,如图 9 所示. 该实验平台主要由伺服电机(舵机 ASME-MRB)、套索(钢丝绳)、柔性梁、NI 控制器组成. 套索在传输力矩的过程中因具有柔性而发生变形,将基于套索传输力矩的方式等效为柔性关节;柔性梁即为柔性负载,在水平面转动. 控制系统是基于 Labview 软件的实时控制. 控制程序由上位机 Labview 软件编写,通过接口将程序下载到 NI-Crio-9053 下位机. 通过传感器采集电机端转角变化信号,经过处理后传入 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. 参数设置如表 4 所示.

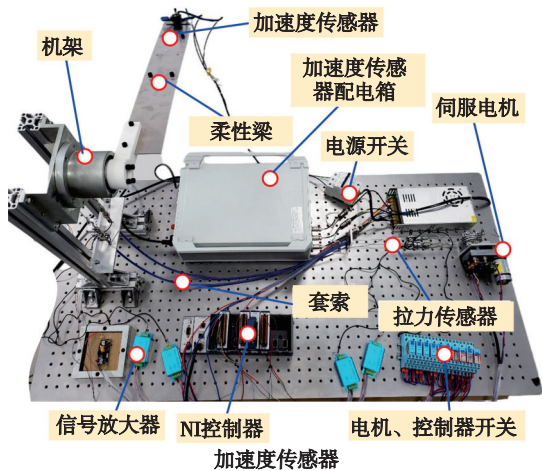


图 9 双柔性机械臂实验平台

Fig. 9 Dual-flexible manipulator experiment platform

在控制实验中,以正弦信号作为柔性机械臂转速的输入信号,使用两种不同的控制方法开展双柔性机械臂的控制实验:传统的 PI 控制策略 (PI)和模糊规则整定参数的 PI 控制策略 (FCPI). 实验得到电机输入输出曲线和不同长度柔性梁的转角误差(e)波动曲线,如图 10 所示.

由图 10 可知,相较于传统 PI 控制,使用模糊整定 PI 控制方法能达到更为精准的跟踪效果,同时能获得更小的柔性负载转角误差. 柔性机械臂处于长度 1 工况时,与传统 PI 控制相比,FCPI 控制策略使电机端转角跟踪误差绝对值的平均值降低 43. 066%,柔性负载转角误差标准差降低 45. 684%;长度 2 工况下,FCPI 控制策略使电机端转角跟踪误差绝对值的平均值降低 39. 636%,柔

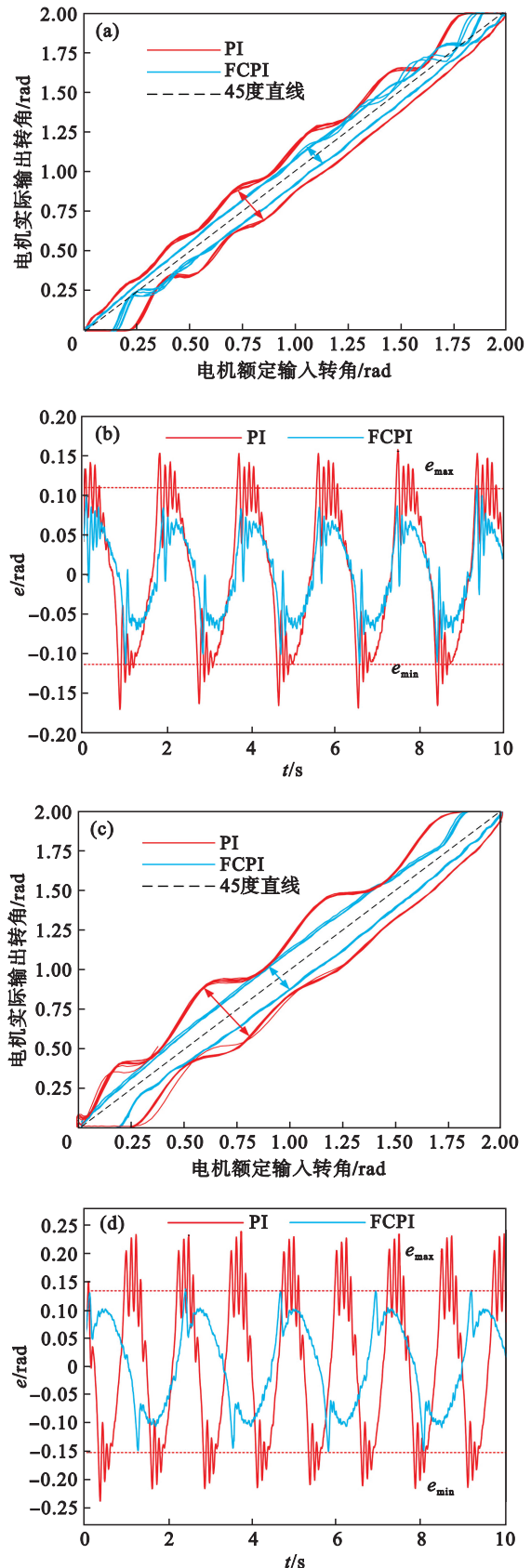


图 10 控制实验结果

Fig. 10 Results of the control experimen

- (a) —长度 1 时电机的输入输出曲线;
- (b) —长度 1 时柔性负载转角误差曲线;
- (c) —长度 2 时电机的输入输出曲线;
- (d) —长度 2 时柔性负载转角误差曲线.

性负载转角误差的标准差降低 46.506%。且机械臂长度较长时,模糊规则整定 PI 参数的控制方法抑制柔性负载末端转角误差波动的效果更明显,具有良好的抑振效果。

6 结 论

1) 本文综合柔性关节、柔性负载、电机端摩擦力矩三种因素,建立了考虑 LuGre 摩擦模型的双柔性机械臂传动系统动力学方程,是更为精准的动力学模型,具有一般适用性。

2) 分析双柔性机械臂动力学方程中包含的转角和模态坐标耦合的非线性项对系统的影响。这些非线性项在机械臂长度较长且抗弯刚度较小的情况下对机械臂的变形量有很大影响,在这种情况下不能忽略不计。

3) 通过控制实验,和传统 PI 控制策略相比,本文所述模糊规则整定 PI 控制器参数的控制策略使柔性负载末端转角误差的标准差最多可降低 46.506%,表明了该控制策略的抑振有效性。

参考文献:

- [1] Shang D, Li X, 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.
- [2] Oh S, Kong K. High-precision robust force control of a series elastic actuator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 22(1): 71-80.
- [3] Spong M. Modeling and control of elastic joint robots [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, 109(1): 310-319.
- [4] 李小彭, 尚东阳, 李凡杰, 等. 输电线巡检机器人位姿变化的柔性关节控制策略 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(11): 1577-1583.
(Li Xiao-peng, Shang Dong-yang, Li Fan-jie, et al. Flexible joint control strategy based on posture change of transmission line inspection robots [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(11): 1577-1583.)
- [5] Katsura S, Ohnishi K. Force servoing by flexible manipulator based on resonance ratio control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(1): 539-547.
- [6] Rezaei V, Shafei A. Dynamic analysis of flexible robotic manipulators constructed of functionally graded materials [J]. *Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Mechanical Engineering*, 2018, 43(1): 327-342.
- [7] Shang D, Li X, Yin M, et al. Speed control strategy of dual flexible servo system considering time-varying parameters for flexible manipulator with an axially translating arm [J]. *Asian Journal of Control*, 2022, 25: 1-15.
- [8] 丁有爽, 肖曦. 基于极点配置的永磁同步电机驱动柔性负载 PI 调节器参数确定方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(4): 1225-1239.
(Ding You-shuang, Xiao Xi. Parameter tuning methods based on pole placement for PI controllers of flexible loads driven by PMSM [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(4): 1225-1239.)
- [9] Shang D, Li X, Yin M, et al. Vibration suppression method based on PI fuzzy controller containing disturbance observe for dual-flexible manipulator with an axially translating arm [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2022, 20(5): 1682-1694.
- [10] Yin M, Shang D, Huang B, et al. Modeling and control strategy of flexible joint servo system in humanoid manipulator driven by tendon-sheath [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(5): 2585-2595.
- [11] Wu X, Huang Y. Adaptive fractional-order non-singular terminal sliding mode control based on fuzzy wavelet neural networks for omnidirectional mobile robot manipulator [J]. *ISA Transactions*, 2022, 121: 258-267.
- [12] Shang D, Li X, 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.
- [13] Astrom K, Canudas-De-Wit C. Revisiting the LuGre friction model [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(6): 101-114.
- [14] Damaren C, Sharf I. Simulation of flexible-link manipulators with inertial and geometric nonlinearities [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1995, 117(1): 74-87.