

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306869

# 改进 LuGre 模型的挖掘机器人摩擦补偿控制\*

姜金叶<sup>1</sup> 冯浩<sup>2,3</sup> 常潇丹<sup>2</sup> 殷晨波<sup>4</sup> 曹东辉<sup>5</sup> 李春彪<sup>2</sup> 谢家学<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学计算机学院 南京 210044; 2. 南京信息工程大学人工智能学院 南京 210044;  
3. 雄宇重工集团股份有限公司 无锡 214100; 4. 南京工业大学挖掘关键技术联合研究所 南京 211816;  
5. 三一重机有限公司 昆山 215300)

**摘要:**非线性摩擦会降低挖掘机器人电液伺服系统的动静态性能,引起轨迹爬行、平峰和稳态误差等现象。经典 LuGre 摩擦模型仅与速度有关,内部鬃毛状态变量无法准确测量,无法全面描述复杂的挖掘机器人电液伺服系统摩擦特性。本文综合考虑电液伺服系统位置、速度和方向等信息,设计了一种改进的 LuGre 摩擦模型,同时引入速度阈值解决了弹性鬃毛平均变形状态观测器不稳定问题。其次,为了解决传统优化算法陷入局部最优解、收敛速度慢等问题,通过引入惯性权重、异步变化和精英突变操作改进基本粒子群优化算法,以精准快速辨识出改进 LuGre 摩擦模型中的 6 个未知参数。最后,结合辨识出的摩擦模型,基于结构不变性原理设计前馈摩擦补偿控制器,并在 23 吨挖掘机器人进行了正弦和三角波不同工况下的轨迹跟踪实验。实验结果表明,传统的比例积分微分控制器跟踪误差最大,三角轨迹最大跟踪误差达到了 29.68 mm,基于改进 LuGre 模型设计的前馈摩擦补偿控制器仅为 9.70 mm,误差减小了 67.31%,基于改进 LuGre 模型设计的前馈摩擦补偿控制器可以有效提升挖掘机器人的轨迹跟踪精度。

**关键词:** 电液伺服系统;摩擦辨识;粒子群优化算法;摩擦补偿;LuGre 模型  
**中图分类号:** TN06;TP27      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.45

## Improved LuGre model for friction compensation control of robotic excavators

Jiang Jinye<sup>1</sup> Feng Hao<sup>2,3</sup> Chang Xiaodan<sup>2</sup> Yin Chenbo<sup>4</sup> Cao Donghui<sup>5</sup> Li Chunbiao<sup>2</sup> Xie Jiaxue<sup>3</sup>

(1. School of Computer Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;  
2. School of Artificial Intelligence, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;  
3. Xiongyu Heavy Industry Group Co., Ltd., Wuxi 214100, China; 4. United Institute of Excavator Key Technology,  
Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 5. SANY Group Co., Ltd., Kunshan 215300, China)

**Abstract:** Nonlinear friction negatively impacts the dynamic and static performance of hydraulic servo systems in robotic excavators, leading to issues such as trajectory creep, flat peaks, and steady-state errors. The traditional LuGre friction model, which relies solely on velocity and internal bristle state variables that cannot be accurately measured, fails to comprehensively describe the complex friction characteristics of excavator hydraulic servo systems. Considering the position, velocity, and direction of the excavator hydraulic servo system, we propose an enhanced LuGre friction model and introduce a velocity threshold to address the instability issue of the elastic bristle average deformation state observer in the friction model. Secondly, to address the issues of traditional optimization algorithms getting stuck in local optimal solutions and having slow convergence speeds, the basic particle swarm optimization algorithm has been enhanced. This enhancement involves the introduction of inertia weight, asynchronous change, and elite mutation operations to accurately and rapidly identify the six unknown parameters in the improved LuGre friction model. Subsequently, using the identified friction model, a friction compensation controller based on the principle of structural invariance is designed. Three different operating

收稿日期:2023-09-04      Received Date: 2023-09-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(52105064)、江苏省自然科学基金(BK20221342)、国家重点研发计划(2021YFB2011904)、江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX23\_0401)资助

condition trajectory tracking experiments were conducted on a 23-ton excavator. The conventional proportional-integral-differential controller exhibits the highest tracking error, with the maximum tracking error for the triangular trajectory reaching 29.68 mm. In contrast, the feedforward friction compensation controller, which is based on the enhanced LuGre model, achieves a significantly lower error of 9.70 mm, representing a 67.31% reduction in error. The experimental results demonstrate that the proposed friction compensation controller significantly enhances the trajectory tracking accuracy of the excavator.

**Keywords:** electro-hydraulic servo system; friction identification; particle swarm optimization algorithm; friction compensation; LuGre model

## 0 引言

电液伺服系统因其成本低、高功重比、污染小、维护简单和环境要求低等优点,在工业控制中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。摩擦是影响挖掘机器人电液伺服系统动态和静态性能的重要因素<sup>[3-4]</sup>。基于摩擦模型的补偿方法是提升挖掘机器人操控性能常用的方法<sup>[5]</sup>。建立精准摩擦模型并辨识出不同工况下的模型参数对摩擦补偿和轨迹跟踪等都具有重要的理论和实践意义<sup>[6-8]</sup>。

学术界已经提出了多种数学模型来描述摩擦特性,如经典库仑摩擦模型、粘性摩擦模型、Dahl 模型、Karnopp 模型<sup>[9]</sup>、LuGre 模型<sup>[10]</sup>、Leuven 模型以及 Maxwell 滑移模型。其中,LuGre 模型最为常用,得益于其能够准确地解释摩擦力粘-滑运动、摩擦滞环、预滑动位移等特性。LuGre 模型包括两个动态参数:鬃毛阻尼系数和鬃毛刚度系数;4 个静态参数:粘性摩擦系数、静态摩擦系数、库仑摩擦系数和 Stribeck 速度系数。Zhou 等<sup>[11]</sup>提出了用于非光滑多体系统的车轮机构的 LuGre 模型。Zhang 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于 LuGre 模型的摩擦补偿方法,并将其用于伺服系统控制中。熊璐等<sup>[13]</sup>基于 LuGre 模型对摩擦非线性进行补偿,并设计了压力自适应控制器。一些学者根据实测摩擦特性对 LuGre 模型进行了改进。Simoni 等<sup>[14]</sup>为机器人操纵器设计了一个带有停留时间效应的新 LuGre 模型。Marques 等<sup>[15]</sup>在 LuGre 模型中添加了一个刚度系数以适应动态系统的参数变化。然而,LuGre 模型仍有一些局限性,描述摩擦特性的准确性有待进一步验证。经典 LuGre 模型仅采用单一速度信号,缺失的位置和方向限制了摩擦模型的精度,也无法适用于摩擦随着挖掘机电液伺服系统行程位置的不同而变化的特征。

此外,LuGre 模型中内部状态变量无法准确测量,精准辨识模型参数困难。两步法与优化算法相结合的辨识方法可以辨识模型参数<sup>[16-17]</sup>,但传统优化算法的目标函数复杂,初始值难以确定,辨识精度和收敛性难以保证。近年来,粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法因其结构简单、辨识精度高而被广泛用于各种优化问题中<sup>[18-20]</sup>。此外,基于精准摩擦模型的补偿方法能够显著提高电液伺服系统的跟踪精度<sup>[21]</sup>。与基于非摩擦模

型的其他补偿方法<sup>[22]</sup>相比,基于摩擦模型的补偿能够更直观地、全面地描述摩擦特性,实现高精度补偿。

本文基于挖掘机器人电液伺服系统特性,引入电液伺服系统行程位置、速度和方向特征,改进 LuGre 模型,能够全面描述系统的摩擦特性。提出了一种改进 PSO 算法以准确辨识出未知的摩擦参数,解决了基本 PSO 算法中收敛速度慢、陷入局部最优解的问题。最后,提出了一种基于改进 LuGre 模型的摩擦补偿控制器,以提高挖掘机器人的轨迹跟踪精度。

## 1 经典 LuGre 模型

挖掘机器人电液伺服系统基本构成,如图 1 所示。

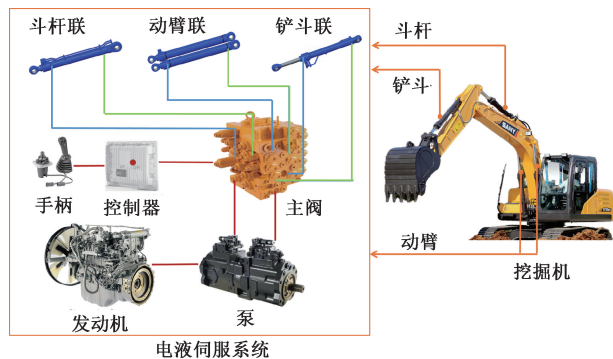


图 1 挖掘机器人电液伺服系统基本组成

Fig. 1 Basic composition of the robotic excavator electro-hydraulic servo system

非线性摩擦是电液伺服系统中的固有现象,会引起爬行、轨迹变形和稳态误差等现象,如图 2 所示。

LuGre 模型是一种动态摩擦模型,它是由法国学者 Candade 和瑞典 Olsson 等<sup>[23]</sup>在 Dahl 模型和鬃毛模型的基础上提出。

$z$  表示接触面上弹性鬃毛的平均变形,为:

$$\dot{z} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \quad (1)$$

式中: $v$  是速度。

稳态  $z_{ss}$  为:

$$z_{ss} = \frac{v}{|v|} g(v) = g(v) \operatorname{sgn}(v) \quad (2)$$



式中: $c_{21}$  和  $c_{22}$  是  $c_2$  的初始值和最终值, $c_{11}$  和  $c_{12}$  是  $c_1$  的初始值和最终值。

3) 增加精英突变操作  
增加精英突变操作给予最优个体更多的搜索机会,避免陷入局部最优。具体精英突变操作方程为:

$$\begin{cases} P_g^* = P_g + \frac{\sum_{i=1}^M v_{id}}{M} \left( \frac{1}{2} + \frac{\text{actan}(\exp(-30t/T_{\max})(1-r/r_{\max}))}{\pi} \right) \\ r = \left| P_g - \frac{\sum_{i=1}^M P_i}{M} \right| \end{cases}$$

(11)

其中, $P_g$  为全局最佳位置, $P_g^*$  为带精英突变策略后的全局最佳位置。

3.3 摩擦参数辨识结果

为了参数辨识和开展摩擦补偿实验,在 23 吨挖掘机机器人上搭建电液伺服实验平台,如图 3 所示。



图 3 参数辨识和摩擦补偿实验平台  
Fig. 3 Parameters identification and friction compensation experiments platform

系统力平衡方程为:

$$F_f = A_1 p_L - F_1$$

(12)

静态摩擦参数为:

$$\theta_s = [f_c, f_m, \sigma_2, v_s]$$

(13)

静态摩擦参数辨识误差为:

$$e = (A_1 p_L - F_1) - [f_c + (f_m - f_c)e^{-(v/v_s)^2} + \sigma_2 v]$$

(14)

辨识的目标是使辨识目标函数  $J$  尽可能小, $J$  为:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n e^2$$

(15)

适应度  $f$  和辨识目标函数  $J$  的关系为  $f = 1/J$ 。

动态摩擦参数定义为

$$\theta_d = [\sigma_0, \sigma_1]$$

(16)

辨识算法流程,如图 4 所示。

在斗杆联电液伺服系统上进行实验,改进的 PSO 算法的主要参数如表 1 所示。改进 LuGre 摩擦模型在 0~

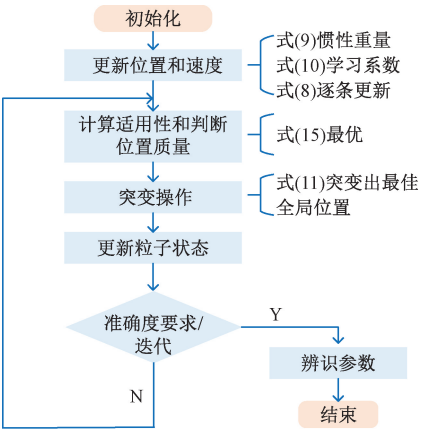


图 4 详细的辨识算法流程

Fig. 4 Detailed identification algorithm flow

400 mm 运动区间内伸出状态下最终动态和静态参数辨识结果如表 2 所示。

表 1 斗杆联电液伺服系统和改进的 PSO 算法主要参数  
Table 1 Main parameters of the arm electro-hydraulic servo system and the improved PSO algorithm

| 符号                               | 静态摩擦                    | 动态摩擦           | 参数              |
|----------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------|
| $A_1$                            | 0.015 4 m <sup>2</sup>  |                | 斗杆无杆腔面积         |
| $\omega$                         | 0.6                     |                | 惯性重量系数          |
| $F_1$                            | 12 kN                   |                | 等效负载力           |
| $\omega_{\max}$                  | 0.9                     |                | 最大惯性重量系数        |
| $c_2$                            | 2                       |                | 学习系数 2          |
| $c_1$                            | 2                       |                | 学习系数 1          |
| $A_2$                            | 0.007 85 m <sup>2</sup> |                | 斗杆有杆腔面积         |
| $\omega_{\min}$                  | 0.4                     |                | 最小惯性重量系数        |
| $c_{11}$                         | 0.5                     |                | $c_1$ 初始值       |
| $c_{12}$                         | 2                       |                | $c_1$ 最终值       |
| $c_{21}$                         | 0.5                     |                | $c_2$ 初始值       |
| $c_{22}$                         | 2                       |                | $c_2$ 最终值       |
| $T_{\max}$                       | 500                     | 200            | 最大迭代次数          |
| $M$                              | 100                     | 40             | 种群规模            |
| $[f_m \min, f_m \max]$           | [20, 60]                | /              | $f_m$ 辨识范围      |
| $[f_c \min, f_c \max]$           | [3, 13]                 | /              | $f_c$ 辨识范围      |
| $[v_s \min, v_s \max]$           | [10, 30]                | /              | $v_s$ 辨识范围      |
| $[\sigma_2 \min, \sigma_2 \max]$ | [0.1, 1]                | /              | $\sigma_2$ 辨识范围 |
| $[\sigma_0 \min, \sigma_0 \max]$ | /                       | [1 000, 3 000] | $\sigma_0$ 辨识范围 |
| $[\sigma_1 \min, \sigma_1 \max]$ | /                       | [100, 300]     | $\sigma_1$ 辨识范围 |

表 2 改进 LuGre 摩擦模型在  
0~400 mm 伸出运动中辨识结果

Table 2 Final identification results of the improved LuGre friction model at 0~400 mm extension movement

| 符号                      | BPSO     | IPSO     | 参数            |
|-------------------------|----------|----------|---------------|
| $f_m$ /kN               | 37.95    | 38.31    | 静态摩擦系数        |
| $f_c$ /kN               | 3.24     | 9.35     | 库仑摩擦系数        |
| $v_s$ /(mm/s)           | 15.59    | 13.82    | Stribeck 速度系数 |
| $\sigma_2$ /(kN/(mm/s)) | 0.37     | 0.29     | 粘性摩擦系数        |
| $\sigma_0$ /(kN/mm)     | 2 135.32 | 2 029.79 | 鬃毛刚度系数        |
| $\sigma_1$ /(kN/(mm/s)) | 227.79   | 207.23   | 鬃毛阻尼系数        |



两种不同粒子群优化算法辨识斗杆联摩擦模型未知参数的收敛曲线如图 5 所示,IPSO 算法的收敛速度和精度更优。在静态参数辨识结果中,BPSO 算法的迭代次数和  $J$  分别为 373 和 45.19,IPSO 算法中只有 241 和 29.52。

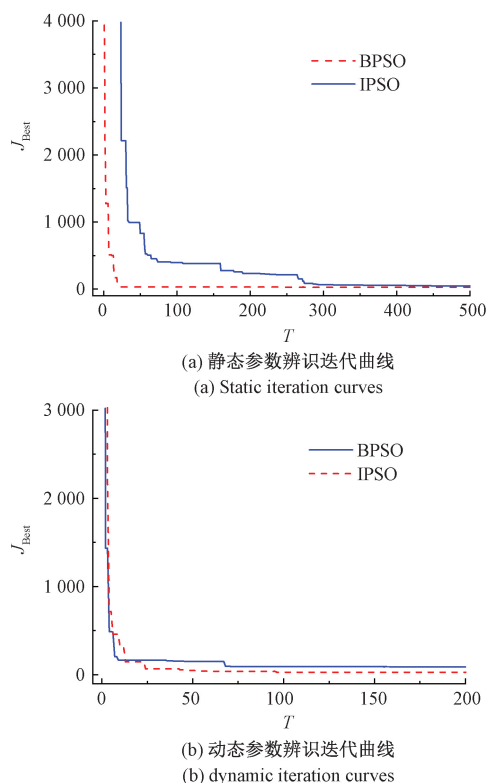


图 5 BPSO 和 IPSO 算法摩擦模型参数辨识收敛曲线

Fig. 5 Different convergence curves of BPSO and IPSO algorithms

挖掘机机器人斗杆联液压缸的有效行程为 1 675 mm,将整个行程分为 4 个部分,范围分别为  $X_1 \in [0, 400]$  mm,范围  $X_2 \in (400, 800]$  mm,范围  $X_3 \in (800, 1\ 200]$  mm,范围  $X_4 \in (1\ 200, 1\ 675]$  mm,对每个部分依次进行辨识。全行程下不同区间斗杆联摩擦参数辨识结果,如图 6 所示。显然,摩擦参数值在每个行程区间中不同,随着斗杆运动方向和行程而变化。在所有参数中,有明显变化的参数是  $f_m$  和  $f_c$ 。在  $[0, 400]$  的范围内, $f_m$  为 38.31。在  $(1\ 200, 1\ 675)$  的范围内, $f_m$  为 40.27,变化了 5.12%。

图 7 对比了 0~400 mm 区间内实测摩擦值和摩擦模型估计值的差异,图 8 为 3 种模型误差。可以发现,Stribeck 模型的精度最差,最大误差为 5.01 kN,其次是经典 LuGre 模型,最大误差为 4.06 kN。改进 LuGre 模型精度最高,最大误差仅为 3.22 kN。

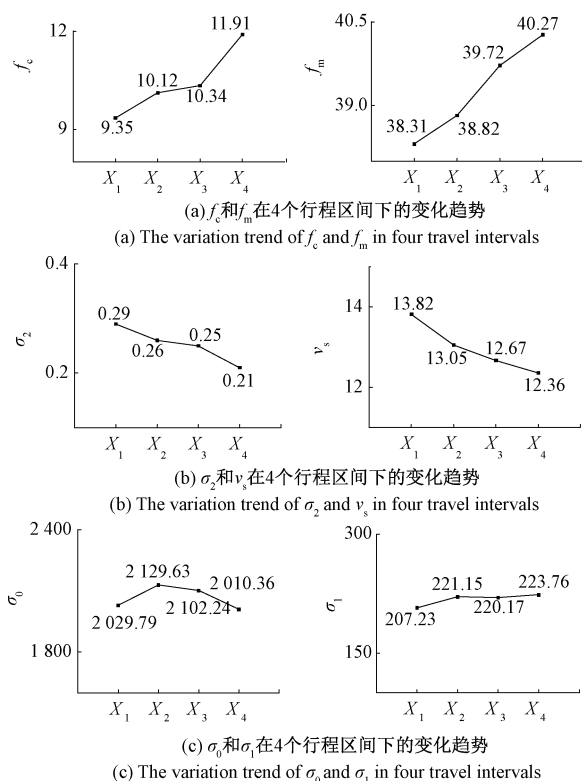


图 6 全行程下不同区间斗杆联摩擦参数的变化

Fig. 6 Friction model parameters of the overall arm electro-hydraulic servo system

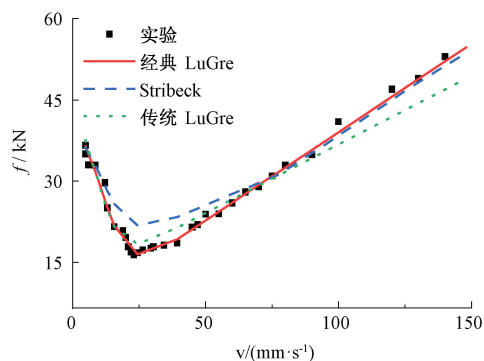


图 7 实验摩擦曲线和摩擦模型曲线

Fig. 7 Experimental friction and friction model curves

## 4 补偿控制器

基于结构不变性原理<sup>[25]</sup>,设计前馈摩擦补偿器(feed-forward control, FC)。在控制信号上叠加一个补偿信号,以提高跟踪精度和性能。摩擦补偿控制器的原理如图 9 所示。摩擦观测器根据改进 LuGre 模型估计实际摩擦力,并通过反馈  $E$  计算出摩擦补偿值。

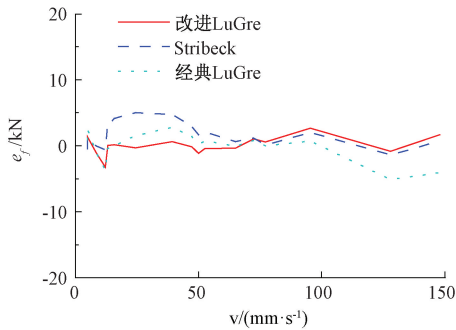


图 8 Stribeck、经典和改进 LuGre 摩擦模型的误差

Fig. 8 Friction errors with Stribeck, traditional and improved LuGre friction models

5 实验验证

在 23 t 的挖掘机器人实验平台上进行轨迹跟踪实验,比较以下 3 种控制策略的差异:控制器 1,仅采用传统的比例积分微分控制器 (proportional integral derivative, PID);控制器 2,基于经典 LuGre 模型的摩擦补偿控制器 (FC+经典 LuGre);控制器 3,基于改进 LuGre 模型的摩擦补偿控制器 (FC+改进 LuGre)。

在频率为 0.05 Hz 振幅为 1 000 mm 的正弦轨迹、频率为 0.05 Hz 振幅为 500 mm 的正弦轨迹、频率为 0.33 Hz 振幅为 500 mm 的三角轨迹下进行轨迹跟踪实

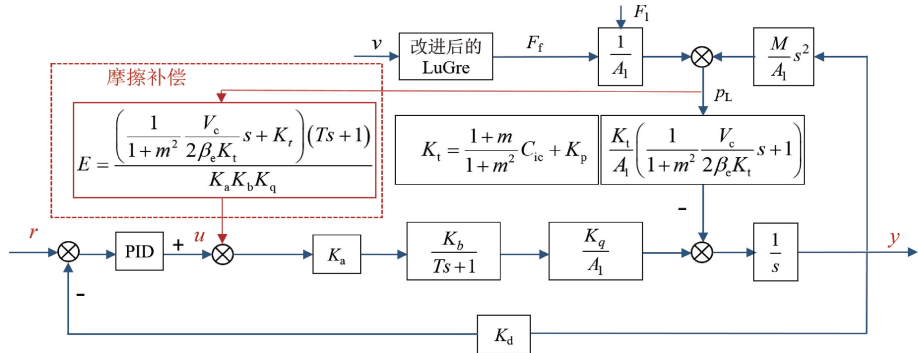


图 9 摩擦补偿控制器方案

Fig. 9 Scheme of the friction compensation controller

验。其中,三角轨迹跟踪为挖掘机器人最常用的修坡工况,精度要求较高,示意图如图 10 所示。两个误差评估指标如表 3 所示。

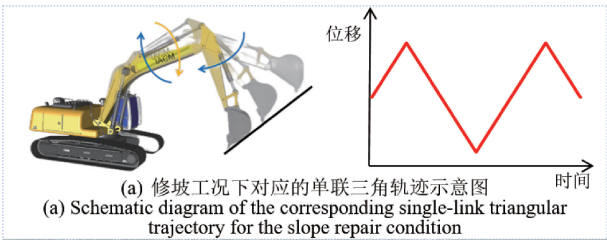


图 10 挖掘机器人最常用的修坡工况轨迹跟踪实验示意图  
Fig. 10 Schematic diagram of the trajectory tracking experiment for slope repair condition of the robotic excavators

表 3 正弦轨迹和三角轨迹下 3 个控制器跟踪误差

Table 3 Tracking errors with three controllers of sinusoidal trajectory and triangular trajectory

| 轨迹波形                       | 指标      | PID   | FC+经典 | FC+改进 |
|----------------------------|---------|-------|-------|-------|
|                            |         |       | LuGre | LuGre |
| 频率 0.05 Hz 振幅 1 000 mm 正弦波 | RMSE/mm | 17.85 | 9.91  | 3.07  |
| 频率 0.05 Hz 振幅 500 mm 正弦波   | 最大误差/mm | 26.22 | 16.90 | 5.16  |
| 频率 0.33 Hz 振幅 500 mm 三角波   | RMSE/mm | 9.98  | 5.29  | 1.94  |
| 频率 0.33 Hz 振幅 500 mm 三角波   | 最大误差/mm | 15.04 | 7.35  | 3.27  |
| 频率 0.05 Hz 振幅 1 000 mm 正弦波 | RMSE/mm | 14.57 | 5.49  | 3.24  |
| 频率 0.05 Hz 振幅 500 mm 正弦波   | 最大误差/mm | 29.68 | 11.21 | 9.70  |

频率为 0.05 Hz、振幅为 1 000 mm 的正弦轨迹跟踪结果和误差如图 11 和 12 所示。在不考虑摩擦影响的 PID 控制器下,方向切换时轨迹会出现平峰现象。在传统 PID 控制器下,电液伺服系统的最大误差和均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 误差是 3 个控制器中最大的,分别为 26.22 mm 和 17.85 mm。采用 FC+改进 LuGre,抑制了平峰现象,与 FC+经典 LuGre 相比,最大轨迹跟踪误差减小了 69.47%,RMSE 误差减小了 69.02%。

频率为 0.05 Hz、振幅为 500 mm 的正弦轨迹跟踪结果和误差如图 13 和 14 所示。评估指标与之前的正弦参考轨迹相比,整体误差较大。两个误差评估指标分别为

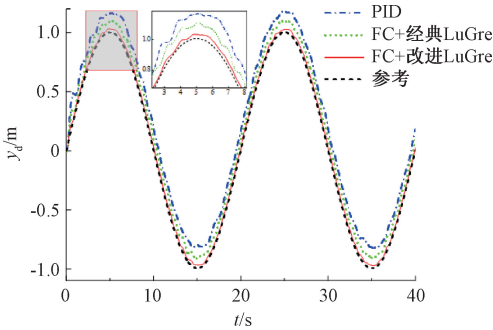


图 11 频率为 0.05 Hz、振幅为 1 000 mm 的正弦轨迹跟踪结果

Fig. 11 Final tracking results of sinusoidal trajectory with frequency 0.05 Hz and amplitude 1 000 mm

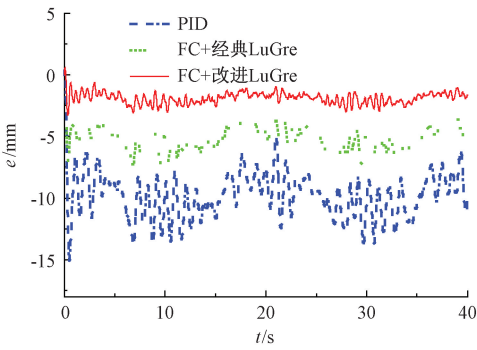


图 14 频率为 0.05 Hz、振幅为 500 mm 的正弦轨迹跟踪误差

Fig. 14 Final tracking errors of sinusoidal trajectory with frequency 0.05 Hz and amplitude 500 mm

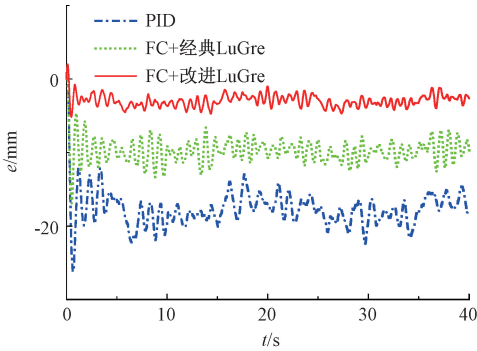


图 12 频率为 0.05 Hz、振幅为 1 000 mm 的正弦轨迹跟踪误差

Fig. 12 Final tracking errors of sinusoidal trajectory with frequency 0.05 Hz and amplitude 1 000 mm

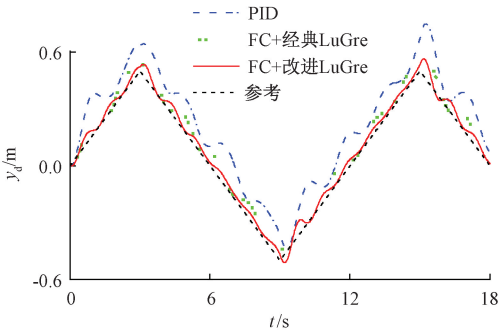


图 15 频率为 0.33 Hz、振幅为 500 mm 的三角轨迹跟踪结果

Fig. 15 Final tracking results of triangular trajectory with frequency 0.33 Hz and amplitude 500 mm

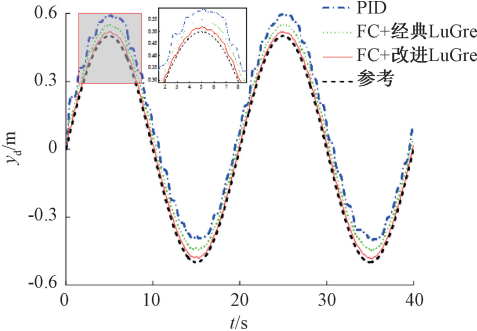


图 13 频率为 0.05 Hz、振幅为 500 mm 的正弦轨迹跟踪结果

Fig. 13 Final tracking results of sinusoidal trajectory with frequency 0.05 Hz and amplitude 500 mm

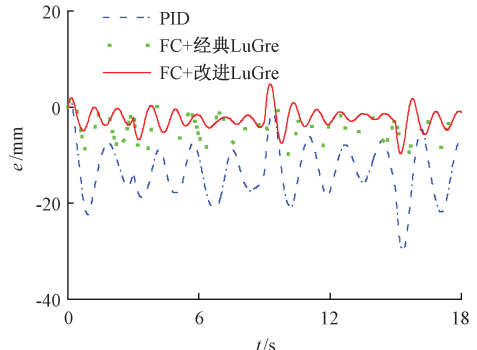


图 16 频率为 0.33 Hz、振幅为 500 mm 的三角轨迹跟踪误差

Fig. 16 Final tracking errors of triangular trajectory with frequency 0.33 Hz and amplitude 500 mm

频率为 0.33 Hz、振幅为 500 mm 的三角轨迹跟踪结果和误差如图 15 和图 16 所示。PID 控制器的跟踪误差最大,最大误差为 29.68 mm,RSME 误差为 14.57 mm。采用 FC+改进 LuGre,最大误差和 RSME 误差分别减小到 9.70 mm 和 3.24 mm,与经典 LuGre 相比最大误差减小了 13.47%,RSME 误差减小了 40.98%。

上述正弦轨迹和三角形轨迹的实验结果表明,基于改进 LuGre 摩擦模型的补偿控制的轨迹精度最高,更接近参考轨迹。

## 6 结 论

本文提出了一种改进 LuGre 模型的摩擦补偿方法,并成功应用于挖掘机器人轨迹跟踪。提出了改进 LuGre 模型,建立了摩擦参数与位置、速度和运动方向之间的耦合关系,能够全面描述挖掘机器人的摩擦特性,解决了传统模型不稳定的问题。另外,提出了一种改进粒子群优化算法以精准辨识改进 LuGre 模型的未知参数。结合改进后的模型和结构不变性原理,设计了一个摩擦补偿器来跟踪正弦轨迹和三角轨迹。在 23 t 挖掘机器人实验平台上进行了轨迹跟踪实验,实验结果表明,基于改进 LuGre 模型的摩擦补偿控制器有效抑制了平峰和爬行现象,提高了电液伺服系统的轨迹跟踪精度。

## 参考文献

- [1] YIN X, ZANG W, JIANG Z, et al. Adaptive robust integral sliding mode pitch angle control of an electro-hydraulic servo pitch system for wind turbine [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 133(4): 105704.
- [2] 王立新, 赵丁选, 刘福才, 等. 基于死区补偿的电液位置伺服系统自抗扰控制[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(12): 1432-1442.  
WANG L X, ZHAO D X, LIU F C, et al. ADRC for electro-hydraulic position servo systems based on dead-zone compensation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(12): 1432-1442.
- [3] 田宇, 孙国法, 王亮. 含摩擦非线性系统的自适应滑模控制[J]. *控制与决策*, 2017, 32(9): 1714-1718.  
TIAN Y, SUN G F, WANG L. Adaptive sliding mode control for nonlinear systems with friction [J]. *Control and Decision*, 2017, 32(9): 1714-1718.
- [4] GU S, YAN C, LIU X, et al. Prescribed performance control for a pneumatic cylinder with strong friction via nonlinear extended state observer [J]. *International Journal of Hydromechatronics*, 2023, 6(4): 359-379.
- [5] QIAN P, LIU L, PU C, et al. Methods to improve motion servo control accuracy of pneumatic cylinders-review and prospect [J]. *International Journal of Hydromechatronics*, 2023, 6(3): 274-310.
- [6] 刘自文, 赵亮, 于鹏, 等. 柔性外骨骼手的抓取力控制方法[J]. *机器人*, 2019, 41(4): 483-492.  
LIU Z W, ZHAO L, YU P, et al. A control method of grasping force for soft exoskeleton hand [J]. *Robot*, 2019, 41(4): 483-492.
- [7] 张春涛, 王勇, 李家旺. 基于摩擦模型的机器人力/位安全控制方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(9): 19-26.
- [8] ZHANG CH T, WANG Y, LI J W. Research on robot force/position safety control method based on friction model [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(9): 19-26.
- [9] 严浙平, 杨皓宇, 张伟, 等. 基于模型预测——中枢模式发生器的六足机器人轨迹跟踪控制[J]. *机器人*, 2023, 45(1): 58-69.  
YAN ZH P, YANG H Y, ZHANG W, et al. Trajectory tracking control of hexapod robot based on model prediction and central pattern generator [J]. *Robot*, 2023, 45(1): 58-69.
- [10] 姜浩, 牛学斌, 张立军, 等. 基于状态重构器的顶驱控制方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(3): 991-1000.  
JIANG H, NIU X B, ZHANG L J, et al. Control method of top drive based on state reconstructor [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(3): 991-1000.
- [11] 黄智鹏, 徐悦鹏, 曹瑞康, 等. 遗传算法与 LuGre 摩擦模型的非线性摩擦力观测器设计[J]. *液压与气动*, 2022, 46(8): 58-69.  
HUANG ZH P, XU Y P, CAO R K, et al. Design of nonlinear friction observer via genetic algorithm and LuGre friction model [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2022, 46(8): 58-69.
- [12] ZHOU Z, ZHENG X, WANG Q, et al. Modeling and simulation of point contact multibody system dynamics based on the 2D LuGre friction model [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 158(5): 104244.
- [13] ZHANG W, LI M, GAO Y, et al. Periodic adaptive learning control of PMSM servo system with LuGre model-based friction compensation [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 167: 104561.
- [14] 熊璐, 韩伟, 余卓平, 等. 考虑关键非线性特征的集成式电子液压制动系统主缸液压力精确控制[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(24): 117-126.  
XIONG L, HANG W, YU ZH P, et al. Pressure precisely control of master cylinder on integrated-electro-hydraulic brake system considering the critical nonlinear characteristics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(24): 117-126.
- [15] SIMONI L, BESCHI M, VISIOLI A, et al. Inclusion of the dwell time effect in the LuGre friction model [J]. *Mechatronics*, 2020, 66(2): 102345.
- [16] MARQUES F, UKASZ W, WOJTYRA M, et al. An investigation of a novel LuGre-based friction force model [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 66: 102345.

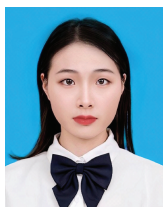


- [16] 张永贤,黄盛科.一种无绝缘轨道电路道砟电阻估算方法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(6):187-194.
- ZHANG Y X, HUANG SH K. Method for ballast resistance estimation in jointless track circuit[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6):187-194.
- [17] ZHOU Q, GUO S, XU L, et al. Global optimization of the hydraulic-electromagnetic energy-harvesting shock absorber for road vehicles with human-knowledge-integrated particle swarm optimization scheme [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(3):1225-1235.
- [18] 林歆悠,王召瑞.应用粒子群算法优化模糊规则的自适应多目标控制策略[J].控制理论与应用,2021,38(6):842-850.
- LIN X Y, WANG ZH R. Adaptive multi-objective control strategy based on particle swarm optimization algorithm optimized fuzzy rules [J]. Control Theory & Applications, 2021,38(6):842-850.
- [19] 邢燕好,于昊,张佳,等.基于粒子群参数优化的 O-VMD 数据处理方法研究[J].仪器仪表学报,2023,44(4):304-313.
- XING Y H, YU H, ZHANG J, et al. Research on the O-VMD thickness measurement data processing method based on particle swarm optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(4):304-313.
- [20] 黄海宏,汪宇航,王海欣.基于粒子群优化粒子滤波算法的 SOC 估算研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(2):245-253.
- HUANG H H, WANG Y H, WANG H X. Research on SOC estimation based on particle swarm algorithm and particle filter algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (2): 245-253.
- [21] 陈明方,何朝银,黄良恩,等.2TPR & 2TPS 并联机构的位姿误差建模与补偿研究[J].仪器仪表学报,2022,43(11):94-103.
- CHEN F M, HE CH Y, HUANG L EN, et al. Research

on pose error modeling and compensation of 2TPR & 2TPS parallel mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(11):94-103.

- [22] REN C, LI X, YANG X, et al. Extended state observer based sliding mode control of an omnidirectional mobile robot with friction compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019: 66(12): 9480-9489.
- [23] CANUDA D W C, OLSSON H, ASTROM K J, et al. A new model for control of systems with friction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40 (3): 419-425.
- [24] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [J]. International Conference on Neural Networks, 1995:1942-1948.
- [25] FENG H, QIAO W H, YIN C B, et al. Identification and compensation of non-linear friction for a electro-hydraulic system[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 141:1-13.

## 作者简介



**姜金叶**,现为南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为流体传动与智能控制。

E-mail: 202212490393@nuist.edu.cn

**Jiang Jinye** is currently a M. Sc. candidate at Nanjing University of Information Science and Technology. Her main research interests include fluid transmission and intelligent control.



**冯浩**(通信作者),2020年于南京工业大学获得博士学位,现为南京信息工程大学副教授、硕士生导师、系主任,主要研究方向为流体传动与控制、人工智能技术。

E-mail: fenghao@nuist.edu.cn

**Feng Hao** (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2020 from Nanjing Tech University. He is currently an associate professor, master's supervisor, and department head of Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include fluid transmission and control, and artificial intelligence technology.