

# 电液伺服系统摩擦参数辨识与补偿控制\*

冯浩<sup>1</sup>, 姜金叶<sup>2</sup>, 宋倩玉<sup>1</sup>, 殷晨波<sup>3</sup>, 俞宏福<sup>4</sup>, 曹东辉<sup>4</sup>

(1. 南京信息工程大学人工智能学院 南京, 210044)

(2. 南京信息工程大学计算机学院 南京, 210044)

(3. 南京工业大学挖掘机关键技术联合研究所 南京, 211816)

(4. 三一重机有限公司 昆山, 215300)

**摘要** 针对非线性摩擦造成挖掘机机器人电液伺服系统稳态误差和低速爬行的问题,需要精准辨识摩擦以进行摩擦补偿。首先,将Karnopp速度阈值理论引入经典Stribeck模型,建立挖掘机机器人电液伺服系统非线性摩擦模型,并根据非对称液压缸力平衡方程建立目标函数,测量不同恒定速度下有杆腔和无杆腔的压力计算实际摩擦力;其次,优化遗传算法的适应度、交叉概率和变异概率,分别采用改进遗传算法和基本遗传算法对摩擦模型中4个未知参数进行辨识;最后,结合前馈补偿控制器进行正弦轨迹跟踪实验。结果表明:所提出的改进遗传算法辨识精度最高,相较于基本遗传算法,模型误差减少了34%;2种摩擦模型下的正弦轨迹跟踪误差分别为26 mm和59 mm,验证了所提出的摩擦模型在提升挖掘机机器人性能上的优越性。

**关键词** 电液伺服系统;挖掘机机器人;摩擦辨识;遗传算法

**中图分类号** TH117;TP27

## 引言

挖掘机机器人电液伺服系统中的摩擦力占整体驱动力矩的10%,是造成系统滞环、低速爬行、稳态误差等现象的主要因素<sup>[1]</sup>。为了提高挖掘机机器人的作业性能,必须建立精准的摩擦力模型,用于设计基于摩擦模型的补偿控制器。

目前,已有数十种非线性摩擦力模型,可以分为静态模型和动态模型,其侧重描述摩擦的不同方面,如Stribeck效应、摩擦记忆、摩擦滞后和爬行等特性。静态模型主要描述速度与摩擦力的关系<sup>[2-4]</sup>。张铁等<sup>[5]</sup>采用Stribeck模型对关节摩擦进行了建模,估计出低速和静止状态下的关节摩擦力。凌明祥等<sup>[6]</sup>基于Stribeck效应建立了电液伺服振动实验系统非线性摩擦理论模型。此外,Stribeck模型还应用于导弹和汽车等领域<sup>[7-8]</sup>。

动态模型可以更加全面地描述摩擦力的摩擦记忆效应、可变静摩擦力和预滑动摩擦等特性。其中,LuGre摩擦模型可以全面描述摩擦力的静、动特性<sup>[9]</sup>。魏琼等<sup>[10]</sup>利用LuGre模型建立了气动位置伺服系统摩擦力模型。赵鹏兵等<sup>[11]</sup>建立了适用于A轴

定位的LuGre摩擦补偿控制器,但是LuGre模型结构复杂,难以精准辨识模型中的2个动态参数。

遗传算法是模拟自然界生物进化机制来求解问题的智能技术。由于遗传算法思想简单、易于实现,并且具有很强的全局优化搜索能力,已经广泛应用于参数优化<sup>[12-13]</sup>和自动控制<sup>[14]</sup>等领域。Du等<sup>[15]</sup>利用遗传算法辨识出传统驱动进给系统中的摩擦参数。Fanelli等<sup>[16]</sup>将遗传算法应用在涡旋膨胀机模型的参数辨识中。运用遗传算法辨识摩擦模型未知参数,不需要复杂的规则就可以求得全局最优解,但其存在早熟收敛、易陷入局部最优解的局限。为此,学者们提出了多种改进算法,如多交叉的实数编码遗传算法<sup>[17]</sup>和自适应遗传算法<sup>[18-19]</sup>等。

笔者引入Karnopp摩擦模型阈值速度至Stribeck模型,建立适用于挖掘机机器人电液伺服系统的摩擦模型,优化遗传算法的适应度、交叉概率和变异概率,对所建立的摩擦模型中的未知参数进行精准辨识,设计摩擦前馈补偿控制器,在23 t的挖掘机机器人上进行正弦轨迹跟踪实验,验证了摩擦模型的有效性。

\* 国家自然科学基金资助项目(52105064);江苏省基础研究计划自然科学基金面上资助项目(BK20221342);国家重点研发计划资助项目(2021YFB2011904);南京信息工程大学科研启动经费资助项目(2021R042);江苏省研究生实践创新计划资助项目(SJCX23\_0401)

收稿日期:2022-02-07;修回日期:2023-06-27

# 1 系统模型

## 1.1 系统概况

图1为挖掘机器人系统简图。系统分为主端和从端,两者通过控制器局域网(controller area network,简称CAN)总线进行数据通讯。主端为操作端,是一个集远程监控、控制算法和数据分析等功能为一体的挖掘机器人轨迹控制可视化平台<sup>[20]</sup>。从端由23 t挖掘机器人和传感器组成,工作装置(动臂、斗杆和铲斗)由4个非对称液压缸驱动。在液压缸上安装拉线式位移传感器获取液压缸位移,在液压缸油口安装压力传感器获取油缸大小腔压力。



图1 挖掘机器人系统简图

Fig.1 System physical configuration of the robotic excavator

## 1.2 非线性摩擦力模型

液压缸低速运动时,低速区的摩擦力与速度成反比关系,呈现出负斜率摩擦现象,即Stribeck现象。Stribeck摩擦模型的表达式为

$$f = f_c \operatorname{sgn}(v) + (f_m - f_c) e^{-(v/v_s)^2} \operatorname{sgn}(v) + \sigma v \quad (1)$$

其中: $f$ 为非线性摩擦力; $f_m$ 为静摩擦力; $f_c$ 为库仑摩擦力; $v$ 为液压缸活塞杆运动速度; $v_s$ 为Stribeck速度; $\sigma$ 为黏性阻尼系数; $\operatorname{sgn}(*)$ 为不连续函数。

$$\operatorname{sgn}(*) = \begin{cases} 1 & (* > 0) \\ 0 & (* = 0) \\ -1 & (* < 0) \end{cases} \quad (2)$$

但是,当相对速度为零时,Stribeck摩擦模型不能反映摩擦力的变化特性。为了避免相对速度为零时表现出的摩擦不连续性,引入Karnopp模型速度阈值的思想<sup>[21]</sup>,设定阈值速度,用连续函数代替不连续函数,提出一种改进的Stribeck摩擦模型。设定零速度阈值 $v_c$  ( $0 < v_c \leq 1$ ),区间 $[-v_c, v_c]$ 中的摩擦力由直线表示<sup>[22-23]</sup>。改进的Stribeck摩擦力曲线如图2所示,其降低了对速度信号的要求,更适合于

工程实践。

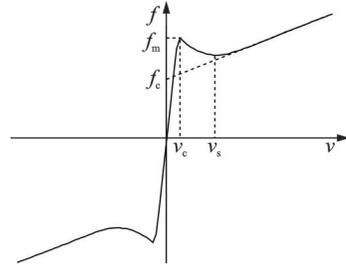


图2 改进的Stribeck摩擦力曲线

Fig.2 Improved Stribeck friction curve

挖掘机器人的非线性摩擦力模型可以表示为

$$f = \begin{cases} f_c r + (f_m - f_c) e^{-(v/v_s)^2} r + \sigma v & (|v| > v_c) \\ \frac{f_m}{v_c} v & (|v| \leq v_c) \end{cases} \quad (3)$$

$$r = \left( \frac{1 - e^{-500v}}{1 + e^{-500v}} \right) \quad (4)$$

# 2 非线性摩擦力测量

## 2.1 实验平台

挖掘机器人的动臂、斗杆和铲斗的工作原理相同,以斗杆系统为例来辨识摩擦力模型中的4个未知参数( $f_m, f_c, v_s$ 和 $\sigma$ )。在23 t SANY挖掘机器人上进行实验,如图3所示。主要器件型号及其参数如表1所示。



1-压力传感器;2-电子罗盘;3-拉线式位移传感器;4-主阀;5-DSP控制器;6-轨迹控制系统;7-SY-235 挖掘机器人

图3 SY-235 23吨挖掘机器人

Fig.3 SANY SY-235 23 t robotic excavator.

表1 主要器件型号及其参数

Tab.1 Main sensors and their model

器件	型号
采集卡	NI USB-6215
控制器	283H
CAN卡	USBCAN-II Pro
位移传感器	SH30-2000-V2
电子罗盘	SCM225
压力传感器	625T4-16-Z23

## 2.2 目标函数的建立

参考挖掘机器人典型的整平、修坡和挖土装车等作业工况,将液压缸的位移参考信号设定为不同的三角波,此时液压缸将处于恒速运动状态,从最低4 mm/s到最高150 mm/s,共设定17组运动速度。采集有杆腔和无杆腔内的工作压力,计算不同恒定速度下的压力差。斗杆液压缸有杆和无杆腔压力曲线如图4所示,可依据力平衡方程计算出摩擦力。在进行低速实验前,控制液压缸以较高的速度往复运动几次,将润滑恢复到正常状态。

液压缸恒速运动时,加速度为零,液压驱动力主要克服摩擦力 $f$ 和负载力 $F_1$ 。斗杆空载运动时,铲斗不与土壤接触,所以斗杆上不会有与土壤接触的干扰力。此时,斗杆的负载力 $F_1$ 主要为斗杆和铲斗的重量。

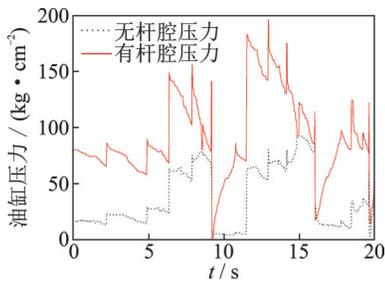


图4 斗杆液压缸有杆和无杆腔压力曲线

Fig.4 Working pressures inside rod and rodless chambers of the arm hydraulic cylinder

液压缸的力平衡表达式为

$$f = A_1 p_1 - A_2 p_2 - F_1 \quad (5)$$

其中: $A_1, A_2$ 分别为无杆腔和有杆腔的有效工作区域; $p_1, p_2$ 分别为为无杆腔和有杆腔压力。

由式(5)可知,测得斗杆液压缸两腔的压力值,即可求出摩擦力 $f$ 。将式(1)代入式(5),得

$$f_c + (f_m - f_c)e^{-(v/v_s)^2} + \sigma v = A_1 p_1 - A_2 p_2 - F_1 \quad (6)$$

摩擦力模型未知参数辨识过程为通过一定的辨识算法寻得一组最佳参数( $f_m, f_c, v_s$ 和 $\sigma$ ),使式(6)两边相等。目标函数设定为

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(f - (f_c + (f_m - f_c)e^{-(v/v_s)^2} + \sigma v))_i]^2 \quad (7)$$

其中: $i$ 为第 $i$ 个速度下的测量值; $n$ 为总测量数。

## 3 参数辨识算法

基本遗传算法(standard genetic algorithm,简称SGA)是模拟自然界遗传机制(选择、交叉和变异)以及生物进化论的一种并行随机搜索优化方法,该

算法数学模型为

$$\text{SGA} = (C, F, P_0, M, \varphi, \mu, \theta, T) \quad (8)$$

其中: $C$ 为编码方式; $F$ 为适应度函数; $P_0$ 为初始种群; $M$ 为群体大小; $\varphi$ 为选择算子; $\mu$ 为交叉算子; $\theta$ 为变异算子; $T$ 为终止条件。

遗传算法存在早熟缺陷,算法中的交叉概率 $P_c$ 和变异概率 $P_m$ 是固定值,对算法进化速度和收敛性有较大影响,因此对遗传算法进行如下改进。

1) 变换适应度尺度。设个体的适应度值为 $f_i$ ,则该个体在 $M$ 个总个体中被选中的概率 $P_i$ 为

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^M f_i} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

通过缩放个体适应值实现适应度尺度变换,将适应度值较大的个体进行缩小,降低其被遗传的概率;对适应度值较小的个体进行放大,增加其被遗传的概率。采用线性尺度变换,既保持了物种的多样性又易于实现。其变换公式为

$$f'_i = a f_i + b \quad (10)$$

其中: $f_i$ 为个体的原适应度值; $f'_i$ 为变换后个体的适应度值; $a, b$ 为系数。

$$\begin{cases} a = \frac{f_{t\text{avg}}}{f_{t\text{avg}} - f_{t\text{min}}} \\ b = \frac{-f_{t\text{min}} f_{t\text{avg}}}{f_{t\text{avg}} - f_{t\text{min}}} \end{cases} \quad (11)$$

其中: $f_{\text{min}}$ 为个体适应度的最小值; $f_{\text{avg}}$ 为个体适应度的平均值。

2) 调整交叉概率 $P_c$ 和变异概率 $P_m$ 。根据算法的不同进化时期来调整 $P_c$ 和 $P_m$ 。当种群趋于收敛时,增大 $P_m$ 并减小 $P_c$ ,可防止算法早熟;当种群个体发散时,增大 $P_c$ 并减小 $P_m$ ,可使算法尽快收敛。同时,为了避免进化初期较优的个体不发生变化,减小局部最优解的可能性,将最大交叉概率和变异概率分别设定为 $P_{c1}$ 和 $P_{m1}$ ,最小交叉概率和变异概率分别设定为 $P_{c2}$ 和 $P_{m2}$ 。

两者的调整公式为

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f'_i - f_{t\text{avg}})}{f_{t\text{max}} - f_{t\text{avg}}} & (f'_i \geq f_{t\text{avg}}) \\ P_{c1} & (f'_i < f_{t\text{avg}}) \end{cases} \quad (12)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_i - f_{t\text{avg}})}{f_{t\text{max}} - f_{t\text{avg}}} & (f_i \geq f_{t\text{avg}}) \\ P_{m1} & (f_i < f_{t\text{avg}}) \end{cases} \quad (13)$$

其中: $f_{\text{max}}$ 为个体适应度最大值; $f'_i$ 为待交叉的个体适应度值; $f_i$ 为待变异的个体适应度值。

目标函数  $J$  和适应度函数  $f_i$  的转化关系为

$$f_i = 1/J \quad (14)$$

改进遗传算法流程图如图5所示。优化非线性摩擦力模型4个未知参数的步骤如下:

- 1) 设置优化参数范围并生成初始种群  $P_0$ ;
- 2) 根据式(7)和式(14)计算个体适应度值  $f_i$ ;
- 3) 变换适应度尺度;
- 4) 根据式(12)计算交叉概率  $P_c$  并对种群进行操作;
- 5) 根据式(13)计算变异概率  $P_m$  并对种群进行操作,产生下一代种群  $P_{t+1}$ ;
- 6) 重复步骤2~5,直至参数达到预定的目标为止。

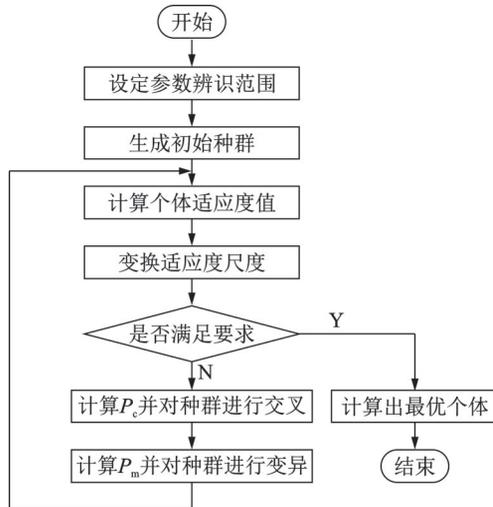


图5 改进遗传算法流程图

Fig.5 The flowchart of improved genetic algorithm

辨识过程中涉及到的相关参数如表2所示。由表可知,  $f_m, f_c, v_s$  和  $\sigma$  的初值可由实际测得的摩擦力曲线大致设定。斗杆液压缸以极低速度运动时测得

表2 辨识过程中涉及到的相关参数

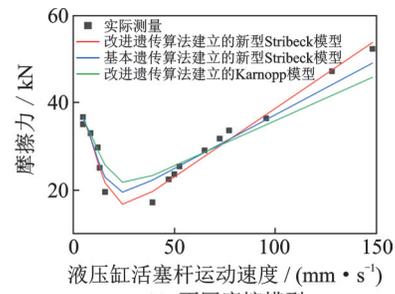
Tab.2 Relevant parameters involved in identification process

参数符号	参数意义	数值
$A_1$	无杆腔工作面积/ $m^2$	0.015 4
$A_2$	有杆腔工作面积/ $m^2$	0.007 85
$F_1$	负载力/ $kN$	12
$M$	种群数量	100
$G$	迭代次数	500
$P_{c1}$	最大交叉概率值	0.990
$P_{c2}$	最小交叉概率值	0.400
$P_{m1}$	最大变异概率值	0.100
$P_{m2}$	最小变异概率值	0.001
$[L_1, U_1]$	$f_c$ 搜索范围	$[0, 10]$
$[L_2, U_2]$	$f_m$ 搜索范围	$[0, 50]$
$[L_3, U_3]$	$v_s$ 搜索范围	$[0, 20]$
$[L_4, U_4]$	$\sigma$ 搜索范围	$[0, 1]$

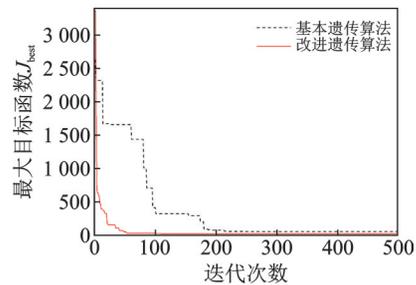
的摩擦力为静摩擦力  $f_m$  的初值;高速段摩擦力的延长线与  $y$  轴的交点为  $f_c$  的初值;高速段摩擦力的斜率为  $\sigma$  的初值;Stribeck 效应结束时的速度点为  $v_s$  的初值。

## 4 辨识结果

选取迭代综合最优的结果,将原始实验数据代入改进遗传算法建立的新型 Stribeck 模型、基本遗传算法建立的新型 Stribeck 模型和改进遗传算法建立的 Karnopp 模型,绘制摩擦曲线与实际摩擦进行比较。不同摩擦模型和辨识收敛曲线如图6所示。由图6(a)可知,3种模型中,Karnopp模型的精度最低,仅在最开始的低速区域拟合较好,在高速区域误差较大。采用改进的遗传算法建立的新型 Stribeck 模型取得了最佳的摩擦计算精度。



(a) Different friction models



(b) Convergence curve

图6 不同摩擦模型和辨识收敛曲线

Fig.6 Different friction models and convergence curves

由图6(b)可知,遗传算法和改进遗传算法优化非线性摩擦力未知参数的最佳目标函数  $J_{best}$  分别为 58.22 和 24.74。经过近 109 次的迭代,改进后的遗传算法收敛,而基本遗传算法需要经过 249 次迭代才收敛。2 种辨识算法的均方根误差 (root mean square error, 简称 RMSE) 分别为 2.58 和 1.70。可见,所提出的改进遗传算法的误差最小,相对于基本遗传算法的摩擦力预测误差减少了 34%。非线性摩擦力参数辨识结果如表3所示。

表3 非线性摩擦力参数辨识结果

参数	遗传算法	改进遗传算法
$f_c/\text{kN}$	7.72	6.34
$f_m/\text{kN}$	39.34	37.95
$v_s/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	15.47	14.83
$\sigma/(\text{kN}\cdot(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})^{-1})$	0.358 4	0.325 8
最佳目标函数 $J_{\text{best}}$	58.22	24.74
最大迭代次数	249	109
RMSE	2.58	1.70

## 5 补偿控制

为了验证摩擦模型精度对挖掘机机器人伺服系统的影响,在基本遗传算法与改进遗传算法辨识出的2种摩擦模型的基础上,基于比例积分微分控制器(proportional integral derivative,简称PID)和结构不变性原理设计前馈补偿控制器<sup>[23]</sup>,以负载压力为观测值,在PID控制器的输入端叠加补偿信号,在斗杆联上进行轨迹跟踪实验。选取正弦信号为参考轨迹,该信号能兼具高速和低速性能,并且对低速运动有一定的局部描述能力。

当参考正弦信号的输入频率为0.05 Hz、幅值为600 mm时,不同模型下正弦跟踪曲线及跟踪误差如图7所示。由图可知,最大跟踪误差发生在轨迹的峰值附近,表明摩擦力是影响挖掘机机器人运动性能的关键因素之一。液压缸在此时运动到位移最大值,最大跟踪误差分别为84 mm和44 mm。整体误

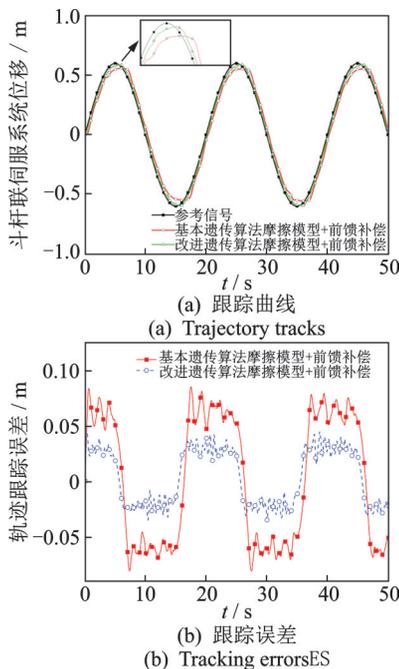


图7 不同模型下正弦跟踪曲线及跟踪误差

Fig.7 Trajectory tracks and tracking errors of different models under sinusoidal signal

差呈现周期性变化,2种模型补偿下的正弦轨迹跟踪误差分别为26 mm和59 mm。采用改进遗传算法辨识出的模型后,轨迹跟踪精度提高了56%,误差的幅值也进一步减小,验证了所提摩擦模型在提升挖掘机机器人性能上的优越性。

## 6 结论

1) 将Karnopp速度阈值思想引入经典Stribeck模型,用连续函数代替不连续函数,建立了能够体现液压缸伸缩和非线性变化特性的改进摩擦力模型。

2) 根据液压缸力平衡方程和不同恒定速度下大小腔压力,计算实际摩擦力并建立了辨识目标函数。

3) 设计改进遗传算法,在不同迭代阶段调整适应度、交叉和变异概率。

4) 采用线性变换方法变换适应度函数,以保持种群的多样性。

5) 自适应调整交叉和变异概率,避免早熟收敛。

6) 利用改进遗传算法辨识摩擦模型中的未知参数,理论计算模型与实际测量摩擦力基本一致,相对于基本遗传算法的摩擦力,计算误差减少了34%,轨迹跟踪精度提高了56%。

## 参 考 文 献

- [1] TAFAZOLI S, LAWRENCE P D, SALCUDEAN S E. Identification of inertial and friction parameters for excavator arms[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(5): 966-971.
- [2] MISYURIN S Y, KREININ G V, NOSOVA N Y. Digital twin of the drive system, considering the forces of various nature[J]. Procedia Computer Science, 2021, 190(12): 611-621.
- [3] LICHTSINDER A, GUTMAN P O. On the dual properties of friction and backlash in servo control systems [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(16): 340-345.
- [4] 李晓晨,岳彩旭,刘献礼,等.考虑刀-屑变摩擦因数的铣削力预测[J].振动、测试与诊断,2022,42(3): 580-587. LI Xiaochen, YUE Caixu, LIU Xianli, et al. Prediction of milling force considering variable friction coefficient between tool and chip [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 580-587. (in Chinese)
- [5] 张铁,洪景东,刘晓刚.基于弹性摩擦模型的机器人免力矩传感器拖动示教方法[J].农业机械学报,2019,50(1): 412-420. ZHANG Tie, HONG Jingdong, LIU Xiaogang. Dragging teaching method without torque sensor for robot based on elastic friction model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 412-420. (in Chinese)

- [6] 凌明祥,朱长春. 液压振动台非线性摩擦力测量与参数辨识[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 687-691. LING Mingxiang, ZHU Changchun. Measurement and parameter identification of nonlinear friction force on hydraulic vibration table[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 687-691.(in Chinese)
- [7] 商霖,周国峰,卢鑫. 导弹滑出箱过程中颤动现象的建模与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 371-375. SHANG Lin, ZHOU Guofeng, LU Xin. Modeling and analysis of vibration phenomenon during missile taxiing out of the box [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(2): 371-375.(in Chinese)
- [8] 李小彭,岳冰,王丹,等. 制动参数对制动系统稳定性的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(1): 73-79. LI Xiaopeng, YUE Bing, WANG Dan, et al. The influence of braking parameters on the stability of braking systems[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(1): 73-79.(in Chinese)
- [9] FREIDOVICH L, ROBERTSSON A, SHIRIAEV A, et al. LuGre-model-based friction compensation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(1): 194-200.
- [10] 魏琼,焦宗夏,王君,等. 基于LuGre模型的气动位置伺服系统摩擦补偿控制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 131-138. WEI Qiong, JIAO Zongxia, WANG Jun, et al. Control of pneumatic position servo with LuGre model-based friction compensation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 131-138.(in Chinese)
- [11] 赵鹏兵,史耀耀,赵盼. 整体叶盘集成制造单元A轴的摩擦补偿控制[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2): 385-393. ZHAO Pengbing, SHI Yaoyao, ZHAO Pan. Friction compensation control of A-axis in blink integrated manufacturing cell [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(2): 385-393.(in Chinese)
- [12] 毛云霄,王英杰,肖军华,等. 基于过桥车辆响应的遗传算法桥梁损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4): 696-703. MAO Yunxiao, WANG Yingjie, XIAO Junhua, et al. Genetic algorithm for bridge damage identification based on the response of bridge vehicles [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 696-703.(in Chinese)
- [13] 刘吉柱,王淑浩,章晓旗,等. 基于遗传算法的直驱SCARA机器人臂长优化设计[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(1): 59-66. LIU Jizhu, WANG Shuhao, ZHANG Xiaoqi, et al. Optimization design of arm length for direct drive SCARA robot based on genetic algorithm [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(1): 59-66.(in Chinese)
- [14] 车军,韩壮,李广军,等. 城轨列车悬挂系统显遗传自适应模糊控制[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(4): 725-731. CHE Jun, HAN Zhuang, LI Guangjun, et al. Explicit genetic adaptive fuzzy control for the suspension system of urban rail trains [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(4): 725-731.(in Chinese)
- [15] DU F X, ZHANG M Y, WANG Z G, et al. Identification and compensation of friction for a novel two-axis differential micro-feed system [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 106: 453-465.
- [16] FANELLI E, PINTO G, CORNACCHIA G, et al. Parameters identification for scroll expander semi-empirical model by using genetic algorithm [J]. Energy Procedia, 2018, 148: 736-743.
- [17] ALI M Z, AWAD N H, SUGANTHAN P N, et al. An improved class of real-coded genetic algorithms for numerical optimization [J]. Neurocomputing, 2018, 275: 155-166.
- [18] FENG H, YIN C B, WENG W W, et al. Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 105: 153-168.
- [19] CHEN J C, CHEN Y Y, CHEN T, et al. Applying two-phase adaptive genetic algorithm to solve multi-model assembly line balancing problems in TFT-LCD module process [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 52: 86-99.
- [20] 冯浩,殷晨波,贾文华,等. 挖掘机器人轨迹控制及运动可视化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(2): 447-453. FENG Hao, YIN Chenbo, JIA Wenhua, et al. Robotic excavator trajectory control and motion visualization [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(2): 447-453.(in Chinese)
- [21] BICAKCI S, AKDAS D, DENIZ KARAOGLAN A. Optimizing karnopp friction model parameters of a pendulum using RSM [J]. European Journal of Control, 2014, 20(4): 180-187.
- [22] 吴子英,刘宏昭,刘丽兰. 考虑摩擦影响的重型车床横向进给伺服系统建模与分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 86-93. WU Ziyang, LIU Hongzhao, LIU Lilan. Modeling and analysis of cross feed servo system of heavy duty lathe subjected to friction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7): 86-93.(in Chinese)
- [23] 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.



**第一作者简介:**冯浩,男,1993年1月生,博士、副教授。主要研究方向为流体传动与控制技术。曾发表《Trajectory control of electro-hydraulic position servo system using improved PSO-PID controller》(《Automation in Construction》2021, Vol.127)等论文。  
E-mail: fenghao@nuist.edu.cn