

文章编号 1004-924X(2018)01-0077-09

## 高加速度运动系统的非线性摩擦前馈补偿控制

崔 晶<sup>1\*</sup>, 王思宇<sup>1</sup>, 楚中毅<sup>2</sup>

- (1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:**高加速度运动系统中非线性摩擦的建模补偿对提高轨迹跟踪性能至关重要。本文针对传统参数化模型难以准确预估高加速度运动启停阶段摩擦过冲等非线性摩擦的问题,在传统模型结构的基础上,结合扩展 Stribeck 模型,提出一种扩展参数化模型,模型参数的训练和学习样本源于高精度迭代学习控制获取的有限轨迹下非线性摩擦前馈补偿数据,并采用 Levenberg-Marquardt 算法拟合模型参数。最后,在音圈电机驱动的高加速定位平台上针对不同运动轨迹进行了实验验证。结果表明,该方法能够克服传统参数化模型难以消除高加速度启停阶段摩擦过冲等非线性摩擦对轨迹跟踪精度的影响;且与迭代学习控制的轨迹跟踪精度接近,有效避免了迭代学习泛化性差等问题,可实现工作空间下任意轨迹的摩擦补偿。

**关键词:**高加速度运动;非线性摩擦模型;前馈补偿;轨迹跟踪控制

**中图分类号:**TP273;TH117.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182601.0077

## Feed-forward compensation control of nonlinear friction for high acceleration motion system

CUI Jing<sup>1\*</sup>, WANG Si-yu<sup>1</sup>, CHU Zhong-yi<sup>2</sup>

- (1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
  2. School of Instrument Science and Opto-Electronics, Beihang University, Beijing 100191, China)
- \* Corresponding author, E-mail: cuijing@bjut.edu.cn

**Abstract:** Modeling compensation of nonlinear friction is vital to improve the trajectory tracking performance of high acceleration motion systems. To overcome the problem of inaccurate estimation of the start-stop stage nonlinear friction (including friction overshoot) associated with the traditional parametric model for high acceleration motion systems, this paper describes a novel extended parametric model combining the traditional model structure with the extended Stribeck model. The training data for identifying the model parameters are obtained using the high-precise Iterative Learning Control (ILC) approach, which supplies the nonlinear friction feed-forward compensation data with limited trajectories in the workspace. The data are fitted with the Levenberg-Marquardt algorithm. Finally, the proposed model is validated with different trajectories on a high acceleration position platform driven by a Voice Coil Motor (VCM). The experimental results indicate that the

收稿日期:2017-04-28;修订日期:2017-07-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61773028);北京市自然科学基金资助项目(No. 4172008)

proposed method can overcome the influence of nonlinear friction associated with the traditional model, including the friction overshoot in the start-stop stage. Moreover, the accuracy is comparable with the result of ILC, but offers the advantage that the proposed model can avoid the problem of poor generalization in ILC to realize the friction compensation of an arbitrary trajectory in the workspace.

**Key words:** high acceleration motion; nonlinear friction model; feed-forward compensation; trajectory tracking control

## 1 引言

随着以集成电路为主体的微电子制造业的迅猛发展,制造装备对各类高加速度运动系统的跟踪精度提出了极高的要求<sup>[1]</sup>。然而这类高加速度运动系统在运动过程中产生的非线性摩擦与位置、速度、加速度以及加加速度等状态量呈现复杂的非线性映射关系,同时需要较宽的响应频率<sup>[2]</sup>。尤其在启停阶段,如何抑制高加速度运动阶段冲击力产生的摩擦过冲<sup>[3]</sup>等复杂的非线性摩擦,是此类高加速度运动系统的控制难点。

消除运动过程中非线性摩擦对轨迹跟踪精度的影响主要有两类方法,一类是基于参数化模型的描述和补偿方法,可分为动态模型和静态模型。动态模型如 LuGre 模型、GMS 模型,虽然解决了过零运动的模型表征和补偿问题,但难以实现对高速不反向运动过程的补偿<sup>[4-5]</sup>。在静态模型方面,为了提高点到点运动过程中的轨迹跟踪精度,文献<sup>[6]</sup>提出了一种考虑库伦摩擦、黏滞摩擦以及滞后效应的参数化模型,但该模型难以表征启停阶段由高加速度所引起的摩擦过冲现象。Stefański, Wojewoda 等人发现摩擦过冲现象中摩擦力的瞬时值不仅是相对运动速度的函数,而且与相对运动加速度有关<sup>[7]</sup>。文献<sup>[3]</sup>针对高加速度运动启停阶段摩擦过冲的问题,提出了一种依赖速度、加速度的扩展 Stribeck 模型,该模型可以有效描述运动系统在启停阶段的非线性摩擦变化,但其结构复杂、参数较多,辨识困难。

另一类是基于非参数化模型的数据描述和补偿方法,如具有极强非线性描述能力的神经网络建模<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>提出了一种基于循环神经网络

(Recurrent Neuro Network, RNN)的摩擦模型,该模型可有效预测非线性摩擦力的变化,但 RNN 模型计算复杂、实时性差。文献<sup>[10]</sup>提出了一种基于 BP 神经网络的摩擦补偿方法,该模型具有高度的自学习和自适应性,但由于 NNs 的本质为梯度下降寻优,导致算法收敛速度慢,且对于复杂的非线性问题易出现局部极小化问题。迭代学习控制 (Iterative Learning Control, ILC) 也是一种基于数据的非线性摩擦建模方法,在这方面,作者已经取得了一定进展,提出了一种基于敏感函数辨识的 ILC 控制方法<sup>[11]</sup>。该方法能够通过重复控制实现系统的精密轨迹跟踪并获取非线性摩擦的前馈补偿数据,且 ILC 作为一种离线控制不受响应带宽的限制。在研究工作中发现,ILC 在固定轨迹下的摩擦补偿无法直接应用于其他任意轨迹,必须通过重新学习和重复控制,泛化能力差,但其多样化轨迹的非线性摩擦前馈补偿数据为模型的训练提供了良好的数据源。

综上所述,基于参数化模型的补偿方法具有计算复杂度低、实时补偿性强等优势,同时 ILC 控制能够获得准确的非线性摩擦前馈数据,训练模型参数。因此,本文在传统模型结构的基础上,结合扩展 Stribeck 模型提出了一种新的扩展参数化模型,并通过 ILC 获取有限轨迹下的非线性摩擦前馈补偿数据进行模型参数的训练和学习,以克服传统参数化模型难以消除高加速度启停阶段摩擦过冲对轨迹跟踪精度的影响,且避免迭代学习泛化性差等不足,实现工作空间下任意轨迹的摩擦补偿。最后,在音圈电机驱动的高加速定位平台上,针对不同运动轨迹验证了扩展参数化模型的有效性。

## 2 实验平台

### 2.1 平台的组成和原理

音圈电机驱动的高加速定位平台如图 1 所示。该平台采用解耦的笛卡尔坐标系方式,驱动机构采用 Trust 线性放大器 TA330 和 LAR0400 型音圈电机,位置反馈采用分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$  的 RGH22S 型直线光栅(RENISHAW 公司),导轨为 THK 超精密滚珠导轨。运动控制器采用美国 DELTA TAU 公司生产的 PMAC(可编程多轴运动控制器)运动控制卡。上位机通过以太网的方式控制运动控制卡的输出,线性放大器将运动控制卡输出的模拟电压信号转变为驱动电流信号,驱动音圈电机进行相应运动,同时由光栅检测当前位置信息并反馈至控制卡中。

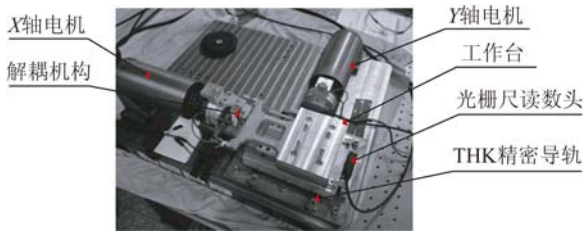


图 1 音圈电机驱动的高加速定位平台

Fig. 1 High acceleration position platform driven by VCM

### 2.2 平台线性模型及控制

为实现系统的精密轨迹跟踪,建立系统动力学模型,并获取其稳定逆模型,作为系统线性部分的前馈补偿,保证系统的鲁棒性,如图 2 所示。

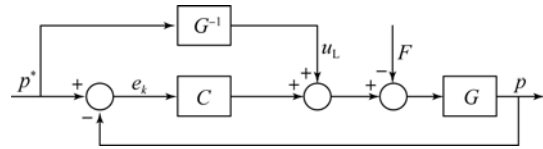


图 2 线性模型控制框图

Fig. 2 Block diagram of linear model

控制结构由前馈控制与反馈控制组成,其中  $C$  为反馈控制器,采用 PD 控制; $G$  为被控对象的动力学模型, $F$  为非线性摩擦, $p^*$  与  $p$  分别为指令位移和实际输出位移,前馈控制中  $u_L$  为逆动力学模型线性补偿。

音圈电机驱动的高加速定位平台结构复杂,很难通过物理建模的方式建立一个准确的数学模型。因此借鉴实验室前期的工作基础<sup>[12]</sup>,采用闭环正弦扫频对系统进行频域辨识,得到位移对电压的离散动力学模型:

$$G(z) = \frac{0.1186z + 0.1181}{z^2 - 1.986z + 0.986} \quad (1)$$

通过 ZPETC 算法获取其稳定逆模型:

$$G^{-1}(z) = \frac{0.986z^{-3} - 1.0046z^{-2} - 0.9767z^{-1} + 0.9953}{0.4723z^{-2}} \quad (2)$$

则系统线性部分的前馈补偿为:

$$u_L(t_i) = \frac{0.986z^{-3} - 1.0046z^{-2} - 0.9767z^{-1} + 0.9953}{0.4723} p^*(t_{i+2}), \quad (3)$$

其中: $i$  是离散采样点, $t_i$  是第  $i$  个采样时刻,采样周期为  $t_{i+1} - t_i = 0.408 \text{ ms}$ 。通过 PMAC 内部伺服环,音圈电机定位平台的线性动态部分通过稳定逆模型进行补偿。

### 3 基于扩展参数化模型的前馈控制

在线性部分补偿的基础上,非线性摩擦是制约高加速度运动系统轨迹跟踪精度的主要问题,设计的扩展参数化模型前馈补偿控制框图如图 3

所示。

首先,通过 ILC 离线获取非线性摩擦前馈补偿实验数据  $u_{IL}^{LC}$ ,分析它与位移  $p^*$ 、速度  $v^*$ 、加速度  $a^*$  以及加加速度  $j^*$  等物理量的关系,建立参数化模型  $u_{NL-pvaj}$ 。然后,针对实验过程中发现的传统参数化模型无法准确预测启停阶段摩擦过冲的问题,引入依赖速度、加速度的扩展 Stribeck 模型  $u_{NL-os}$ ,完善启停阶段传统参数化模型的结构和数据表征。最后,通过有限轨迹下的迭代学习前馈数据进行模型参数的训练和学习,据此实现

高加速度运动系统在任意轨迹下的扩展参数化模型前馈补偿控制。

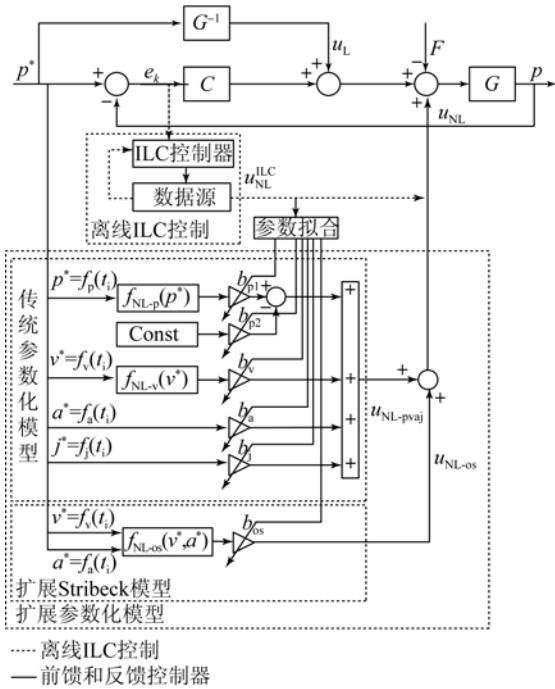


图 3 扩展参数化模型前馈补偿控制框图

Fig. 3 Block diagram of feed-forward compensation control based on extended parametric model

### 3.1 基于迭代学习控制的非线性摩擦前馈补偿数据

获取准确的非线性摩擦前馈补偿数据是建立扩展参数化模型的基础,参考实验室已有的基础工作<sup>[11]</sup>,采用能够实现精密轨迹跟踪的迭代学习控制来离线获取非线性摩擦前馈补偿数据,作为模型参数辨识的数据源。

在 ILC 控制实验中,为减小运动过程中引发的高频振荡,指令轨迹采用五阶位移曲线,即:

$$p^* = \begin{cases} A \left[ 6 \left( \frac{t}{T_r} \right)^5 - 15 \left( \frac{t}{T_r} \right)^4 + 10 \left( \frac{t}{T_r} \right)^3 \right], & 0 \leq t \leq T_r \\ A, & t > T_r \end{cases} \quad (4)$$

其中 A 与  $T_r$  分别为行程和上升时间,通过调整这两个参数可获得不同的加速度曲线。为丰富训练样本,在全行程上选择十组不同上升时间的训练样本, A 为 4.5~18 mm,  $T_r$  为 38~65 ms,最大加速度为 1.799~3.843 g。

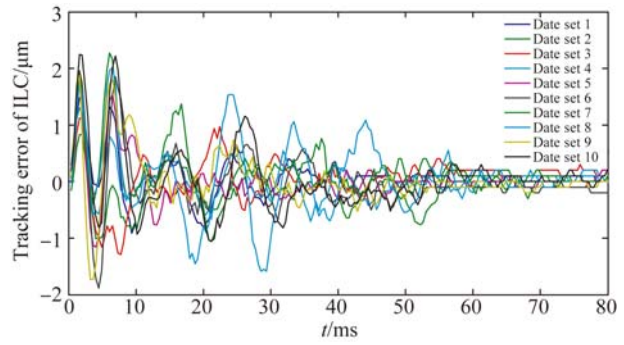


图 4 ILC 控制下训练样本的轨迹跟踪性能

Fig. 4 Tracking performance of training sets with ILC

表 1 ILC 控制下训练样本的轨迹跟踪性能实验数据  
Tab.1 Performance of training sets data with ILC

样本	最大加速度/g	行程/mm	上升时间/ms	最大跟踪误差/ $\mu\text{m}$	均方根/ $\mu\text{m}$
1	1.80	4.5	38	1.48	0.37
2	2.05	15	65	1.01	0.31
3	2.31	10	50	1.28	0.32
4	2.57	16	60	1.31	0.26
5	2.89	8	40	1.96	0.35
6	2.99	10.5	45	1.95	0.47
7	3.26	13	48	2.27	0.41
8	3.34	17.5	55	2.01	0.6
9	3.75	12	43	1.87	0.44
10	3.84	18	52	2.24	0.52

图 4 为十组训练样本的轨迹跟踪性能,具体数据由光栅尺测量得到,如表 1 所示。可以看出所有样本轨迹的最大跟踪误差和均方根分别小于 2.27  $\mu\text{m}$  和 0.6  $\mu\text{m}$ ,说明 ILC 控制能够有效补偿高加速度运动系统的非线性摩擦,可以作为拟合扩展参数化模型的数据源<sup>[2]</sup>。

### 3.2 非线性摩擦的扩展参数化模型

传统参数化模型<sup>[6]</sup>通常选取指令位移、速度、加速度以及加加速度等 4 个物理量表征它与非线性摩擦间的映射关系。挑选表 1 中样本 1,3 和 10 三组轨迹,图 5 为基于 ILC 控制得到的非线性摩擦前馈补偿实验数据与三组轨迹的指令位移、速度、加速度以及加加速度等物理量的关系曲线。

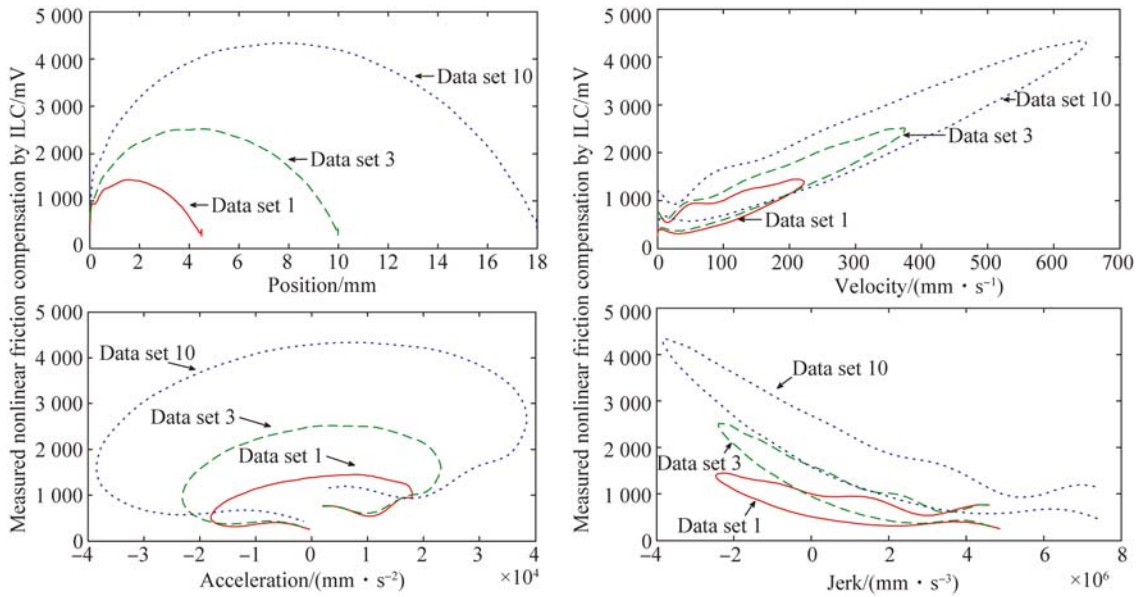


图 5 ILC 前馈补偿数据与样本轨迹的指令状态关系

Fig. 5 Relationship between feed-forward compensation by ILC and corresponding command trajectory

从图 5 中可以发现,位移特性中,在曲线的启动和停止阶段,都会存在一定的非线性摩擦,这种现象类似于库伦摩擦,但是不同于库伦摩擦是一个常值,启停阶段的非线性摩擦存在一定的差异,因此在常值的基础上,要引入指数项,即  $f_{NL-p}(p^*)$ ;与速度相关的非线性摩擦补偿类似于黏滞摩擦,但考虑线性函数不能够准确地表达非线性摩擦与指令速度的关系,因此采用幂函数表征  $f_{NL-v}(v^*)$ ;与加速度相关的非线性摩擦补偿类似于滞回效应,这是由于实际模型和数学模型之间的电机惯量差别导致的,则加速度特性可表示为  $f_{NL-a}(a^*)$ ;由于系统加速度加大,应考虑加加速度与非线性摩擦的关系,两者之间具有一定梯度,类似于线性函数,则可表示为  $f_{NL-j}(j^*)$ ,因此,基于传统参数化模型的非线性摩擦估计  $u_{NL-pvaj}$  为<sup>[6]</sup>:

$$u_{NL-pvaj} = f_{NL-p}(p^*) + f_{NL-v}(v^*) + f_{NL-a}(a^*) + f_{NL-j}(j^*) = b_{p1} \cdot (1 - e^{-\frac{p^*}{b_{p3}}}) - b_{p2} + b_{vl} \cdot v^* \frac{1}{b_{v2}} + b_a \cdot a^* + b_j \cdot j^* \quad (5)$$

从图 5 还可以看出,速度和加速度特性在启停阶段具有强非线性摩擦,传统参数化模型虽然考虑了库伦摩擦、黏滞摩擦和滞回效应等,但并没有考虑启停阶段的非线性摩擦。高加速度运动系统启动过程中,由于相对运动界面存在大量关联结,当速度从零逐渐增大时,摩擦力也逐渐增大,

直到关联结断裂,摩擦力增大到一个极值<sup>[13]</sup>。由于关联结的自身惯性,摩擦力会有一个突然下降的过程,此时运动过程由预滑动转入宏观滑动阶段,这一过程也被称为摩擦过冲。停止过程同样存在摩擦过冲问题<sup>[3]</sup>。

在发生摩擦过冲,即摩擦过程从预滑动转为宏观滑动时,摩擦力从位移依赖转为速度依赖,由于系统启停过程中加速度较小,摩擦力也依赖于加速度的符号<sup>[14]</sup>,而对加速度的变化依赖较小。因此,本文借鉴扩展 Stribeck 模型<sup>[3]</sup>的结构,对传统参数化模型进行拓展,完善其启停阶段非线性摩擦的表征,结合两者的优势,提出了一种扩展参数化模型  $u_{NL}$ :

$$u_{NL} = u_{NL-pvaj} + u_{NL-os} = b_{p1} \cdot (1 - e^{-\frac{p^*}{b_{p3}}}) - b_{p2} + b_{vl} \cdot v^* \frac{1}{b_{v2}} + b_a \cdot a^* + b_j \cdot j^* + \text{sgn}(a^*) \cdot \frac{b_{os1}}{1 + |v^*/b_{os2}| b_{os3}}, \quad (6)$$

其中:  $u_{NL-os}$  为依赖速度函数和加速度符号的扩展 Stribeck 模型,  $b_{os1}$ ,  $b_{os2}$  和  $b_{os3}$  分别为速度函数的参数。

根据前述 ILC 离线获取的非线性摩擦前馈补偿数据,采用 Levenberg-Marquardt 算法拟合传统参数化模型和扩展参数化模型参数,模型拟合的均方根分别为 66.90 mV 和 51.89 mV,参数拟合结果见表 2。

表 2 模型参数拟合结果

Tab. 2 Fitting result of model parameters

传统参数化模型参数	拟合结果	扩展参数化模型参数	拟合结果
$b_{p1}$	-9 934	$b_{p1}$	3 415.7
$b_{p2}$	27.866	$b_{p2}$	641.26
$b_{p3}$	-10 134	$b_{p3}$	463.83
$b_{v1}$	0.036 5	$b_{v1}$	0.014 6
$b_{v2}$	1.045 9	$b_{v2}$	0.986 3
$b_a$	4E-05	$b_a$	4E-05
$b_j$	3E-07	$b_j$	3E-07
		$b_{os1}$	9 509.5
		$b_{os2}$	-3E-05
		$b_{os3}$	1.874 8

### 4 实验测试

以图 1 所示的高加速定位平台为实验对象,控制框图如图 3 所示,利用式(3)计算出的逆动力学模型作为系统线性部分补偿,反馈控制器中 PD 参数分别为 600 和 1 100,选取五阶位移曲线作为指令轨迹。在此基础上,验证扩展参数化模型(式(6))非线性摩擦估计的有效性以及它对高加速度运动系统的轨迹跟踪性能,模型参数见表 2。

#### 4.1 扩展参数化模型有效性验证

为验证所提出模型的有效性,本文对比了不同轨迹下扩展参数化模型、传统模型预测的非线性摩擦与 ILC 获取的前馈数据,并分别统计了其误差百分比。在全行程下挑选 4 组均为 45 ms 的测试轨迹样本,特征参数见表 3。图 6 为 ILC 前馈数据分别与传统模型、扩展参数化模型的非线性摩擦估计的对比。图 7 给出了参数化模型非线性摩擦估计的误差百分率,误差百分率  $\lambda(j)$  定义为:

$$\lambda(j) = \frac{|u_{NL}^m(j) - u_{NL}^{ILC}(j)|}{u_{NL}^{ILC}(j)} \cdot 100\%, \quad (7)$$

其中  $u_{NL}^m$  为基于参数化模型的非线性摩擦估计。

表 3 测试轨迹的特征参数

Tab. 3 Characteristic parameters of test trajectory

样本	1	2	3	4
最大加速度/g	2.57	3.14	3.71	4.28
行程/mm	9	11	13	15

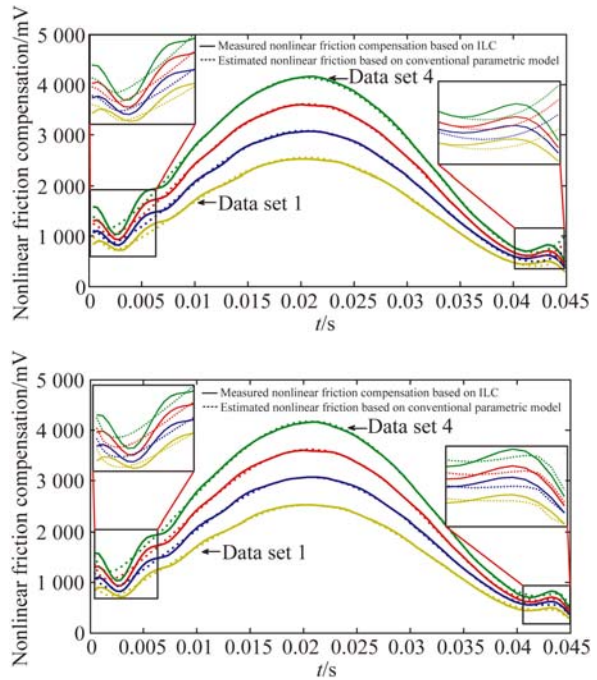
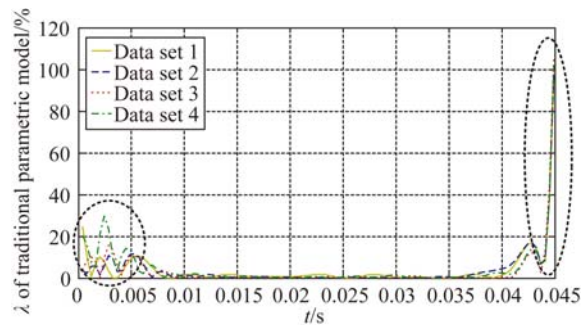


图 6 ILC 和两种参数化模型的非线性摩擦前馈补偿数据对比

Fig. 6 Contrast of nonlinear friction feed-forward compensation between ILC and two parametric models

从图 6 可以看出,与 ILC 相比,在运动过程中两种模型的预测精度均较高,但在启停阶段传统模型的非线性摩擦估计误差较大。这是因为传统模型仅考虑了库伦摩擦、黏滞摩擦以及滞后效应等对轨迹跟踪精度的影响,而没有考虑启停阶段的摩擦过冲问题。

图 7 为两种参数化模型非线性摩擦估计的误差百分率。从图可以看出,扩展参数化模型中由于引入了依赖速度函数和加速度符号的扩展 Stribeck 模型,启停阶段的非线性摩擦估计误差大幅度降低,具有更好的预测性能。



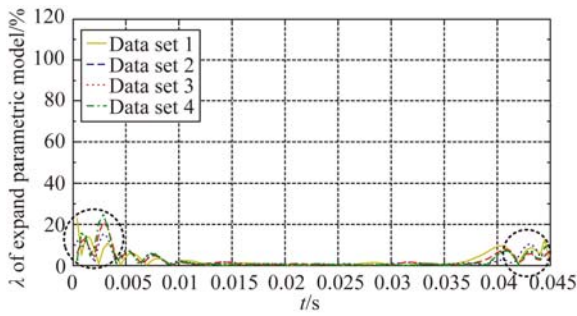


图 7 两种参数化模型非线性摩擦估计的误差百分率  
Fig. 7 Percentage error of estimated nonlinear friction by two parametric models

### 4.2 高加速度运动系统轨迹跟踪效果验证

为验证所提出模型的轨迹跟踪性能, 对比了

高加速度运动系统分别基于扩展参数化模型、传统模型以及 ILC 等三种前馈控制方法的轨迹跟踪性能。在全行程内选取 8 组不同参数的测试轨迹, 表 4 为 8 组测试轨迹的特征参数。

表 4 八组测试轨迹的特征参数

Tab. 4 Characteristic parameters of eight test trajectories

样本	1	2	3	4	5	6	7	8
最大加速度/ $g$	2.165	2.684	2.794	3.007	3.107	3.339	3.564	3.843
行程/ $mm$	6	9	9.8	12	14	17.5	18	18
上升时间/ $ms$	40	44	45	48	51	55	54	52

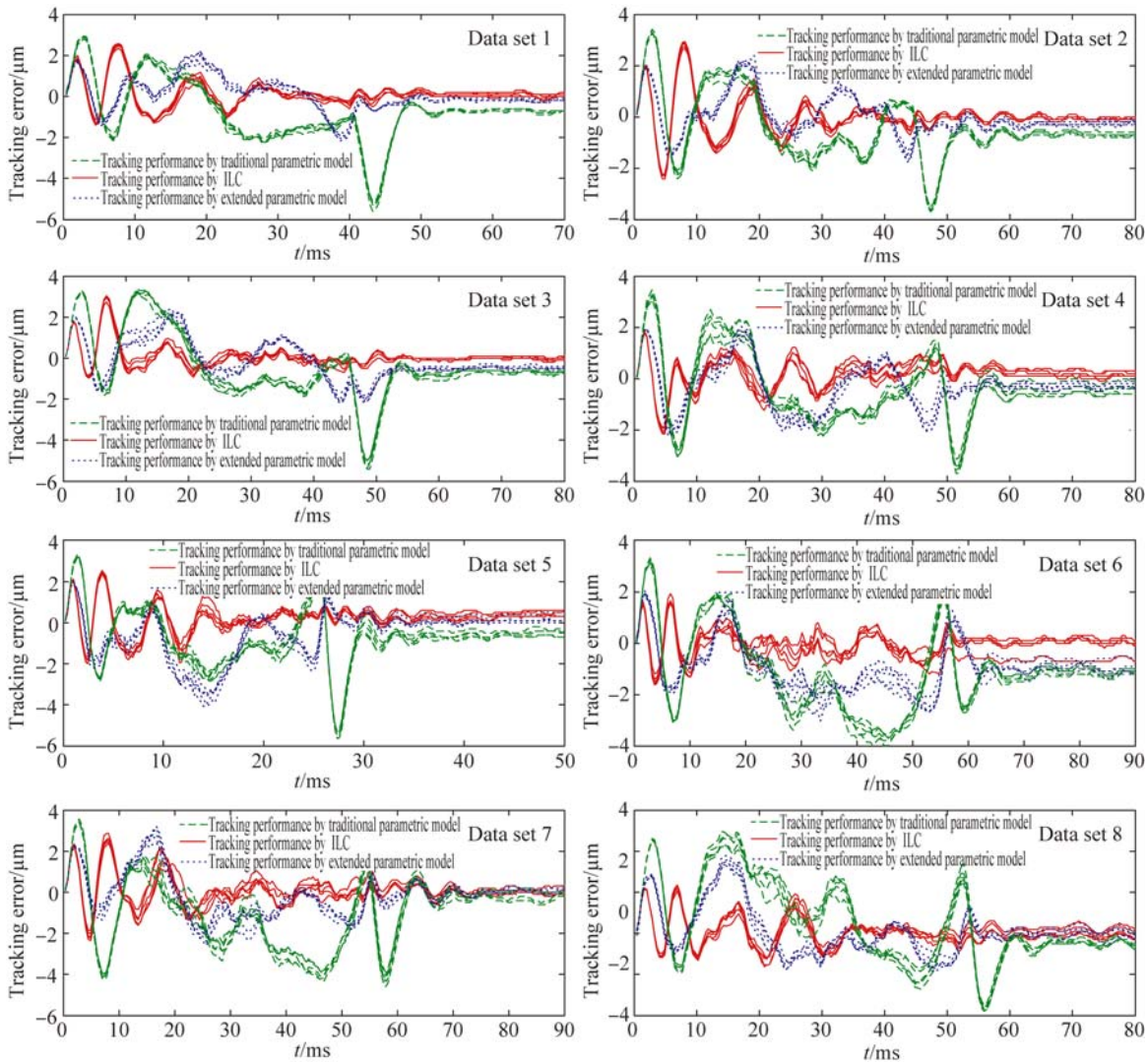


图 8 三种前馈控制方法的轨迹跟踪性能对比

Fig. 8 Comparison of tracking performance among three feed-forward controls

图 8 为测试轨迹基于三种前馈补偿控制方法分别重复五次的跟踪性能曲线。同时,统计了五次重复实验的最大跟踪误差和五次重复实验的均方根平均值,如表 5 所示。

表 5 八组测试轨迹最大跟踪误差和均方根平均值

Tab. 5 Maximum tracking error and root mean square average of eight test trajectories

样本	最大跟踪误差/ $\mu\text{m}$			均方根平均值/ $\mu\text{m}$		
	传统参数化模型	ILC	扩展参数化模型	传统参数化模型	ILC	扩展参数化模型
1	5.60	2.58	2.10	1.60	0.63	0.79
2	3.70	2.93	2.40	1.32	0.70	0.74
3	5.40	3.04	2.43	1.56	0.47	0.89
4	3.86	2.16	2.26	1.33	0.56	0.98
5	5.65	2.54	3.91	1.48	0.70	1.26
6	3.99	1.93	2.77	1.96	0.48	1.00
7	4.31	2.86	3.20	1.98	0.66	1.01
8	4.94	2.35	3.77	1.93	0.61	0.95

从实验结果可以看出,扩展参数化模型与 ILC 控制的轨迹跟踪性能接近,但它避免了 ILC 控制针对不同运动轨迹需重复学习的问题。另外,在上述所有测试样本中,传统参数化模型的最大跟踪误差为  $3.86\sim 5.65\ \mu\text{m}$ ,均方根平均值的最大值为  $1.98\ \mu\text{m}$ ;而扩展参数化模型的最大跟

踪误差为  $2.1\sim 3.91\ \mu\text{m}$ ,均方根平均值的最大值为  $1.26\ \mu\text{m}$ 。与传统模型相比,扩展参数化模型能够准确预测启停阶段的非线性摩擦,使得跟踪性能大幅度提高。综合考虑跟踪性能和计算复杂度,扩展参数化模型更适用于高加速度运动系统在不同指令轨迹下的启停运动控制。

## 5 结 论

本文采用前馈补偿的控制方法,仅根据指令轨迹即可实现非线性摩擦的有效补偿。针对传统参数化模型难以准确预估高加速度运动启停阶段摩擦过冲的问题,在该模型结构的基础上,结合扩展 Stribeck 模型,提出一种扩展参数化模型。分别对比了扩展参数化模型与 ILC、传统参数化模型的非线性摩擦前馈数据和轨迹跟踪性能。结果表明,扩展参数化模型有效克服了传统参数化模型难以消除高加速度启停阶段的摩擦过冲对轨迹跟踪精度的影响,且与 ILC 的跟踪性能接近,弥补了迭代学习泛化性差等不足。

本文提出的扩展参数化模型和方法用于补偿高加速启停运动平台中涉及的非线性摩擦的前馈补偿控制技术,是伺服反馈控制环节的有益补充和实现高性能轨迹跟踪的关键所在。该方法主要依据指令数据和迭代学习补偿数据,对其他运动平台形式如:伺服电机驱动、滚珠丝杠等平台的高加速启停运动也有一定的参考意义和实际应用价值。

## 参考文献:

- [1] 李泽源. 基于二自由度理论和内模原理的高速高精度伺服控制器综合设计方法 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [2] ITO K, MAEBASHI W, YAMAMOTO M, *et al.*. Fast and precise positioning by sequential adaptive feed-forward compensation for disturbance[C]. *Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, IEEE, 2010: 19-23.
- [3] 张新刚. 基于扩展 Stribeck 效应的摩擦实验建模及系统动力学研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] HOSHINO D, KAMAMICHI N, ISHIKAWA J. Friction compensation using time variant disturbance observer based on the LuGre model [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 2012, 79: 1-6.
- [5] YOON J Y, TRUMPER D L. Friction modeling, identification, and compensation based on friction hysteresis and Dahl resonance [J]. *Mechatronics*, 2014, 24(6): 734-741.
- [6] YAMAMOTO M, IWASAKI M, ITO K, *et al.*. Precise disturbance modeling for improvement of positioning performance [J]. *Electrical Engineer-*

ZHANG X G. *Researches of Experimental Modeling and System Dynamics on Frictions Concerning Extended Stribeck Effect* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)

- ing in Japan, 2010, 171(2): 31-39.
- [7] STEFAŃSKI A, WOJEWODA J, WIERCIGROCH M, *et al.*. Chaos caused by non-reversible dry friction [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2003, 16(5): 661-664.
- [8] 王一光, 陈兴林, 李晓杰. 光刻机工件台宏动三自由度建模及自适应神经网络控制 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 132-140.  
WANG Y G, CHEN X L, LI X J. Three degrees of freedom modeling and adaptive neural network control for long-stroke wafer stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 132-140. (in Chinese)
- [9] SHENJ C, LU Q ZH, WU C H, *et al.*. Sliding-mode tracking control with DNLRX model-based friction compensation for the precision stage [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(2): 788-797.
- [10] 刘明晓, 龙绪明. 基于BP神经网络的贴片机运动精度控制 [J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22(12): 3973-3975, 3979.  
LIU M X, LONG X M. Movement precision control of SMT placement based on BP neural network [J]. *Computer Measurement & Control*, 2014, 22(12): 3973-3975, 3979. (in Chinese)
- [11] CUI J, ZHAO F, CHU ZH Y, *et al.*. Experiment on trajectory tracking control of high precise positioning system based on iterative learning controller with wavelet filtering [J]. *Mechatronics*, 2015, 32: 88-95.
- [12] 崔晶, 王迪凡. X-Y精密定位平台的敏感函数逆前馈补偿控制 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 1081-1087.  
CUI J, WANG D F. Feedforward compensation control of X-Y precise positioning table using inversed-sensitive function [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1081-1087. (in Chinese)
- [13] LAMPAERT V, AL-BENDER F, SWEVERS J. Experimental characterization of dry friction at low velocities on a developed tribometer setup for macroscopic measurements [J]. *Tribology Letters*, 2004, 16(1-2): 95-105.
- [14] STEFAŃSKI A, WOJEWODA J, FURMANIK K. Experimental and numerical analysis of self-excited friction oscillator [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2001, 12(9): 1691-1704.

#### 作者简介:



崔晶(1976—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,硕士生导师,2004年于哈尔滨工业大学机器人研究所获得博士学位,主要从事精密运动控制、嵌入式系统等方面的研究。E-mail: cuijing@bjut.edu.cn



王思宇(1993—),女,辽宁人,硕士研究生,2015年于沈阳工业大学获得学士学位,主要从事精密运动控制等方面的研究。E-mail: 2466204688@qq.com