

文章编号 1004-924X(2014)08-2135-07

温度变化下的伺服系统非线性摩擦建模

谭文斌^{1,2*}, 李醒飞², 赵新华³, 姚 旺², 张晨阳¹

(1. 天津商业大学 机械工程学院, 天津 300131; 2. 天津大学 精密测试技术及仪器
国家重点实验室, 天津 300072; 3. 天津理工大学 机械工程学院, 天津 300384)

摘要:针对机械伺服系统因温度变化产生的非线性摩擦变化,提出了一种反映温度因素的摩擦建模方法来实现对伺服系统的摩擦补偿。首先,分析了温度和摩擦的关系,并结合修正黏性摩擦的 LuGre 模型,讨论了该模型各参数与温度之间的关系。利用单隐层 BP 神经网络描述了随温度变化的各个参数,并确定了神经网络的输入、输出以及传递函数。然后,通过神经网络训练获得神经网络参数,从而得到与温度相关的摩擦模型。最后,改变运行条件,验证了提出的模型对摩擦的估计能力。建立的摩擦模型在不同运行条件、不同温度状态下的最大相对估计偏差小于 2.5%,表明其能很好地估计系统摩擦力矩,满足高精度摩擦补偿。

关键词:伺服系统;温度变化;非线性摩擦建模;LuGre 模型

中图分类号:TH703;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2135

Nonlinear friction modeling for servo systems in changed temperatures

TAN Wen-bin^{1,2*}, LI Xing-fei², ZHAO XIN-hua³, YAO Wang², ZHANG Chen-yang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300131, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and
Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
* Corresponding author, E-mail: twb@tju.edu.cn

Abstract: In consideration of the nonlinear friction from changed temperatures of a mechanical servo system, a nonlinear friction modeling related to the temperature change was proposed to achieve high precision friction compensation of the servo system. Firstly, the relationship between temperature and friction was analyzed, and the dependence of the parameters on the temperature in the model was further analyzed based on the modified LuGre model of viscous friction. Then, the single hidden layer BP neural network was used to describe the parameters changed with temperature and to determine the input, output parameters and transfer functions of the neural network. Furthermore, an experiment was designed and parameters of the neural network were obtained by training the neural network, by which the friction model related to temperature change was implemented. Finally, the ability of the model for friction estimation was verified by changing operation conditions. The experimental results indicate that the maximum relative estimation error of the frictional model is less than 2.5% when it is

收稿日期:2013-12-11;修订日期:2014-01-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50975206)

applied under different operation and temperature conditions. The friction model related to the temperature change estimates system friction torques in various operating conditions accurately and satisfies the need of high precision friction compensation.

Key words: servo system; temperature variation; nonlinear friction modeling; LuGre model

1 引言

非线性摩擦普遍存在于机械伺服系统中,它会对机械伺服系统产生极大的不利影响^[1-2]。同时机械伺服系统在工作时,机械部件的相对运动也不可避免地存在着温度变化,从而直接引起摩擦发生变化^[3-4]。随着高端加工、高端测量等行业的不断发展,对机械伺服系统的精度和性能要求越来越高,对非线性摩擦的实时补偿已成为当前先进制造领域的研究热点。基于摩擦模型的补偿作为摩擦补偿方法中应用最为广泛的一种,可快速预估系统的摩擦力矩,进而实现非线性摩擦的实时补偿,而其首要任务就是建立一个反映温度因素的精确摩擦模型。

随着对摩擦研究的不断深入,摩擦模型经历了由静态模型到动态模型的发展过程^[5],其中 Canudas 等人^[6-7]于 1995 年提出的 LuGre 摩擦模型,已成为当前基于模型的摩擦补偿时最常用的一种。Felix 等人^[8]利用 LuGre 模型减轻了非理想振动;于伟等人^[9]基于 LuGre 模型对精密伺服转台进行了摩擦补偿;文献^[10]还针对高速阶段随着速度的增加,摩擦力矩的增加幅度降低的现象,提出了修正黏性摩擦的 LuGre 摩擦模型。但是现有的 LuGre 摩擦模型及其相关改进模型一般只描述位置、速度与摩擦的关系,不能反映温度因素对摩擦的影响。针对温度与摩擦间的关系,国内外一些学者进行了相关研究,但也存在着一定的不足,Zhao 等人^[11]通过相应的研究,用模糊理论建立了速度、温度与摩擦的关系,然而该模型属于经验模型,理论依据不足且鲁棒性较差;Lörinc Márton 等人^[12]提出一个反映温度因素的状态量,并基于该状态量建立了摩擦模型,但该模型没直接使用温度值,且只反映了黏性摩擦与温度的关系。

本文提出了一种温度变化条件下的伺服系统摩擦建模方法,分析温度变化对摩擦的影响,结合

文献^[10]提出的修正黏性摩擦的 LuGre 模型,获得了该模型参数与温度变化的关系,并以温度为输入,建立了该模型参数的神经网络模型,从而实现了温度变化情况下伺服系统的非线性摩擦建模。

2 LuGre 摩擦模型及改进

2.1 修正黏性摩擦的 LuGre 摩擦模型

该模型发展于传统 LuGre 摩擦模型,解决了传统模型不能反映伺服系统在速度较高时,其摩擦力矩随速度增加其增长趋势减缓现象的问题,模型描述如下^[10]:

$$T(\dot{\theta}) = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + B_{\eta 1} (1 - e^{-B_{\eta 2} |\dot{\theta}|}) \operatorname{sgn}(\dot{\theta}), \quad (1)$$

$$\dot{z} = \dot{\theta} - \frac{|\dot{\theta}|}{g(\dot{\theta})} z, \quad (2)$$

$$\sigma_0 g(\dot{\theta}) = T_c + (T_s - T_c) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_s}\right)^2}, \quad (3)$$

式中: $\dot{\theta}$ 表示电机角速度, σ_0 为刚性系数, σ_1 为阻尼系数,均为动态摩擦参数; T_c 为库伦摩擦, T_s 为静摩擦, $\dot{\theta}_s$ 为切换速度, $B_{\eta 1}$ 为黏性摩擦斜率因子,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$, $B_{\eta 2}$ 为黏性摩擦变化因子,单位为 s/rad ,均为静态摩擦参数。该模型假设 $g(\dot{\theta})$ 总是严格正实且有界。

2.2 反映温度因素的摩擦模型

如图 1 所示,润滑剂黏度随温度变化而变化,因此黏度相关的摩擦参数 $B_{\eta 1}$ 、 $B_{\eta 2}$ 也将随之改变。而 T_c 、 T_s 、 $\dot{\theta}_s$ 反映伺服系统的低速摩擦特性,因此,温度变化时,摩擦副作用力和润滑状态的变化,将导致这 3 个参数发生变化。

因此,基于式(1)~(3)描述的摩擦模型,利用 Γ 表征温度变化,再通过 $T_c(\Gamma)$ 、 $T_s(\Gamma)$ 、 $\dot{\theta}_s(\Gamma)$ 、 $B_{\eta 1}(\Gamma)$ 和 $B_{\eta 2}(\Gamma)$ 分别描述 T_c 、 T_s 、 $\dot{\theta}_s$ 、 $B_{\eta 1}$ 和 $B_{\eta 2}$ 与温度的关系,得到以下模型:

$$T_f(\dot{\theta}, \Gamma) = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + B_{\eta 1}(\Gamma) (1 - e^{-B_{\eta 2}(\Gamma) |\dot{\theta}|}) \operatorname{sgn}(\dot{\theta}), \quad (4)$$

$$\dot{z} = \dot{\theta} - \frac{|\dot{\theta}|}{g(\dot{\theta})} z, \quad (5)$$

$$\sigma_0 g(\dot{\theta}) = T_c(\Gamma) + (T_s(\Gamma) - T_c(\Gamma)) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_s(\Gamma)}\right)^2}, \quad (6)$$

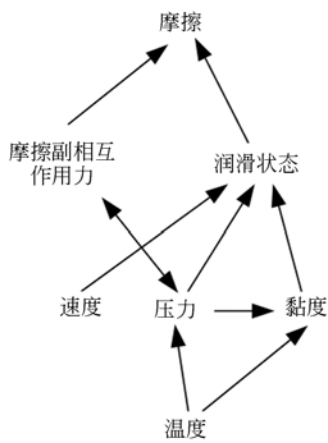


图 1 温度与摩擦的关系

Fig. 1 Relationship between temperature and friction

由于黏度、压力随温度变化的非线性,且存在耦合影响,从物理学角度建立摩擦参数与温度变化关系的数学模型较为困难。而神经网络具有良好的非线性处理能力,因此,结合工程应用的需要,采用结构相对简单的单隐层 BP 神经网络来描述静态摩擦参数与温度变化 Γ 的关系:

$$[T_c(\dot{\Gamma}), T_s(\dot{\Gamma}), \hat{\theta}_s(\dot{\Gamma}), B_{\theta 1}(\dot{\Gamma}), B_{\theta 2}(\dot{\Gamma})]' = \text{purelin}(W_2 \times a_1 + b_2), \quad (7)$$

$$a_1 = \text{tansig}(W_1 \times \dot{\Gamma} + b_1), \quad (8)$$

其中: $\dot{\Gamma} = [\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots]$ 表示受摩擦影响温度显著变化部位的温度所组成的温度序列; purelin 为线性传递函数, tansig 为正切 S 形传递函数, 而 W_1, W_2, b_1 和 b_2 则为神经网络相关结构参数。

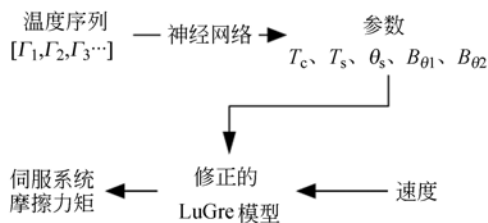


图 2 反映温度因素的摩擦模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of friction model for reflecting temperature factors

式(4)~(8)为基于 LuGre 模型提出的反映温度变化的伺服系统非线性摩擦模型。

该模型的工作流程如图 2 所示,首先,利用训练得到的神经网络,根据伺服系统的温度数据,计

算得到各种摩擦参数 $T_c(\Gamma), T_s(\Gamma), \hat{\theta}_s(\Gamma), B_{\theta 1}(\dot{\Gamma})$ 和 $B_{\theta 2}(\dot{\Gamma})$; 然后,利用修正黏性摩擦的 LuGre 模型,根据运行速度估计此时伺服系统的摩擦力矩。

3 模型参数辨识方法

由于式(4)~(6)中的静态参数通过式(7)和(8)来体现,因此,模型需要辨识的参数包括:动态参数 α_0 和 α_1 , 以及神经网络参数 W_1, W_2, b_1, b_2 。其中,动态参数可按文献[5]方法获得;神经网络参数则按照如图 3 所示方法获得。

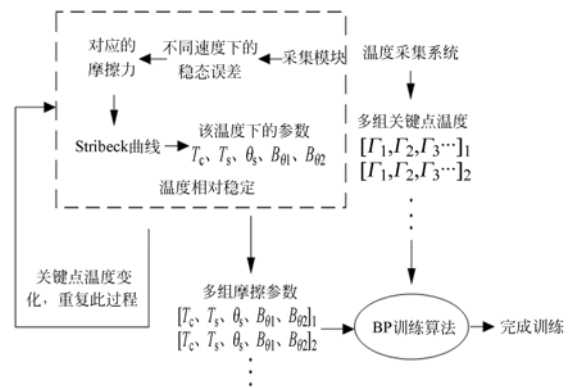


图 3 摩擦参数的 BP 网络训练流程

Fig. 3 Training process of BP network for friction parameters

采集不同速度时的系统稳态误差,并推算相应的摩擦力矩,进而辨识得到各摩擦参数^[5],同时记录此时的温度序列;然后,使系统继续运行,以不断改变温度序列,并得到不同温度状态下伺服系统的摩擦参数;最后,将各组温度和其对应的摩擦参数分别作为神经网络的输入和输出,训练该网络,从而得到其结构参数 W_1, W_2, b_1 和 b_2 。

4 实验及结果分析

4.1 实验方案设计

图 4 所示为一种典型的开放式伺服系统,由工业控制计算机、Turbo PMAC 运动控制器、交流伺服系统、滚珠丝杠螺母副、直线导轨以及运动平台等组成。

控制室温为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 50%, 并每 5 s 采集一次螺母、丝杠等部位的温度。除获

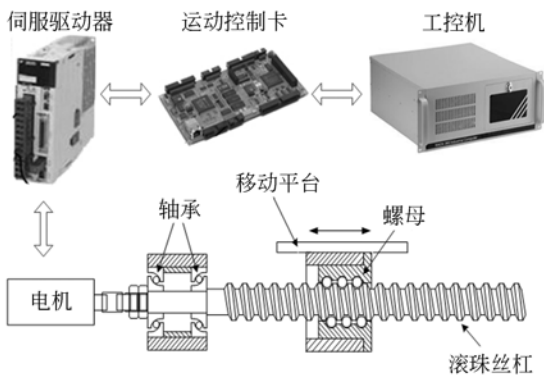


图 4 系统结构图

Fig. 4 System structure diagram

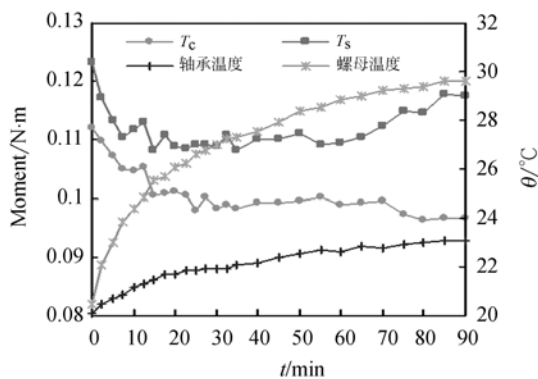
取稳态误差数据外,均控制伺服运动平台以一定速度进行往复运动,从而使伺服系统温度上升。

实验开始时,每隔 2 min 暂停往复运动,并采集伺服系统的稳态误差。如此持续 15 次后,间隔时间改为 5 min,再持续采集 10 次,共获得 25 组不同温度状态下的稳态误差数据,以此作为 1 组。然后,不断改变往复运动速度,获得多组实验数据。取其中 1 组数据作为模型参数辨识实验,其他组则用以验证模型的准确性。

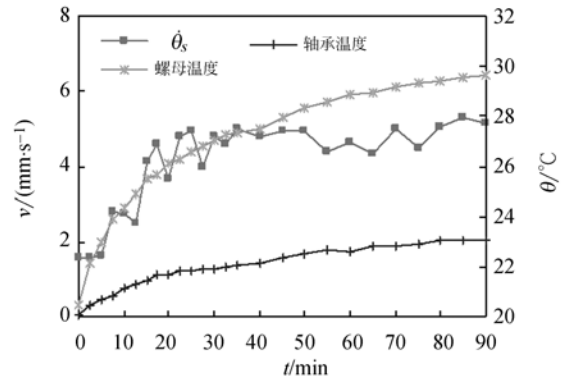
4.2 模型参数辨识

以往复运动速度为 80 mm/s 作为模型训练实验,记为实验 A。

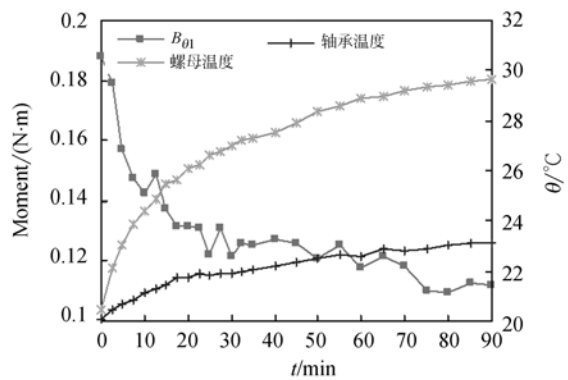
首先,利用实验 A 得到的稳态误差和温度数据,得到不同温度状态下对应的参数 T_c 、 T_s 、 $\dot{\theta}_s$ 、 B_{01} 、 B_{02} ,如图 5 所示。可以看出, T_c 、 $\dot{\theta}_s$ 、 B_{01} 随温度增加呈减小趋势; T_s 变化较为复杂,随着温度的增加,先增加后减小;而 B_{02} 则近似不变。



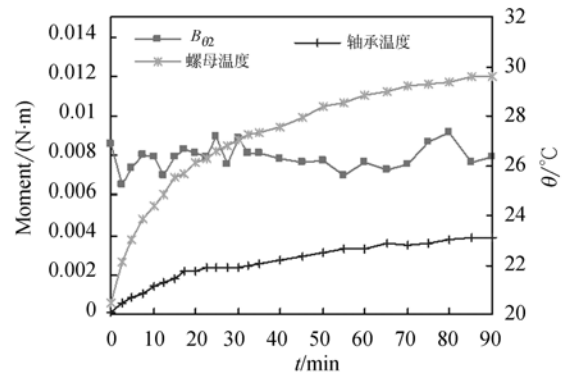
(a) T_c 、 T_s



(b) $\dot{\theta}_s$



(c) B_{01}



(d) B_{02}

图 5 实验 A 中不同温度条件下的摩擦参数

Fig. 5 Friction parameters at different temperatures in experiment A

然后,根据摩擦参数和温度数据,对 BP 神经网络进行训练,完成第二部分的参数辨识,进而可到完整的反映温度因素的摩擦模型。

由于 B_{02} 近似不变,可取其平均值 0.008 作为估计值,因此,摩擦参数与温度序列的神经网络中,输出层只有 4 个参数,即节点数为 4。此外,

该网络的输入层和隐含层的节点数分别为 2 和 3。通过神经网络训练,可得到模型参数为:

$$W_1 = \begin{bmatrix} -2.127 & 1.167 \\ 0.625 & 2.253 \\ 0.645 & 2.183 \end{bmatrix}, b_1 = \begin{bmatrix} 2.421 \\ 0.335 \\ 2.561 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} 0.579 & -0.834 & 0.397 \\ 0.035 & -0.150 & -0.716 \\ 0.521 & 0.919 & -0.069 \\ 0.501 & -0.676 & 0.055 \end{bmatrix}, b_2 = \begin{bmatrix} -0.895 \\ 0.196 \\ -0.605 \\ -0.589 \end{bmatrix}$$

4.3 模型验证

首先,对比建模实验 A 中,模型估计的摩擦力矩和实验测得的摩擦力矩。如图 6 所示,图 6(a)为轴承、螺母温度分别为 22.1 和 26.4 °C 时的结果,最大相对估计误差为 1.9%,此时速度为 80 mm/s;图 6(b)为轴承、螺母温度分别为 22.8 和 29.2 °C 时的结果,最大相对估计误差为 2.4%,此时速度为 4 mm/s。

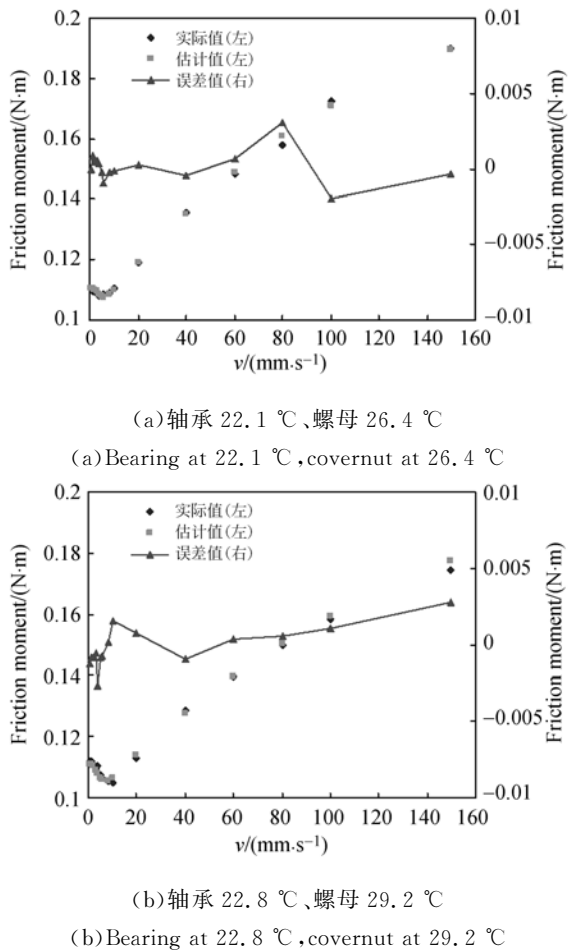


图 6 实验 A 中实测与模型估计的摩擦力矩
Fig. 6 Friction torque measured and estimated in experiment A

然后,为验证模型的广泛适用性,需要不断改变伺服系统的工况,进行模型验证。本文取其中往复运动速度为 40 mm/s 的实验作为验证实验 B。

图 7 所示为实验 B 中两种不同温度条件下,实际的摩擦力矩和模型估计得到的摩擦力矩对比图。其中,图 7(a)为轴承、螺母温度分别为 21.5 °C、23.4 °C 时的结果,最大相对估计误差为 2.5%,此时速度为 0.5 mm/s;图 7(b)为轴承、螺母温度分别为 23.1 °C、28.3 °C 时的结果,最大相对估计误差为 2.1%,此时速度为 8 mm/s。

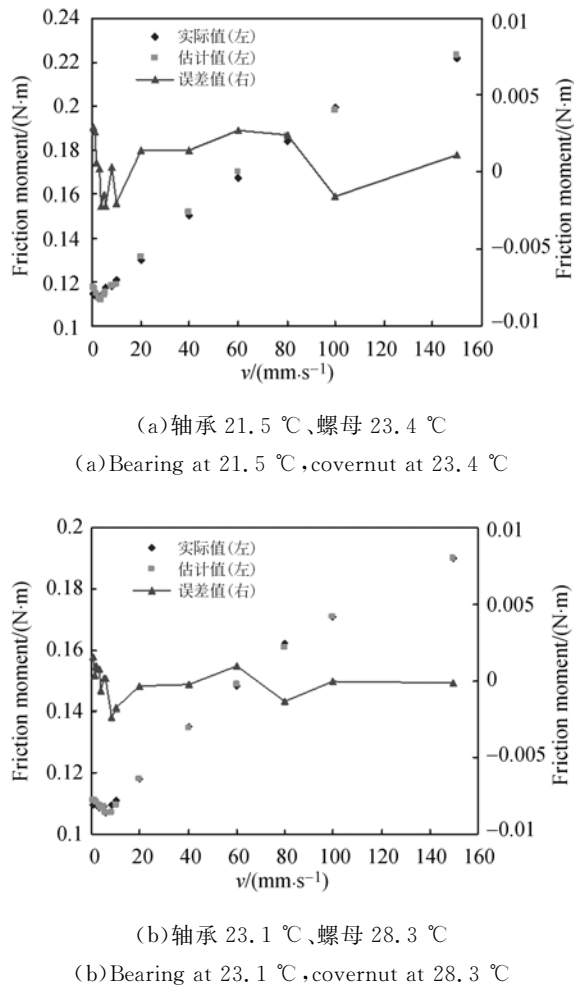


图 7 实验 B 中实测与模型估计的摩擦力矩
Fig. 7 Friction torque measured and estimated in experiment B

由此可知,利用神经网络描述修正黏性摩擦的 LuGre 模型各摩擦参数,所建立的反应温度因素的摩擦模型,在不同的运行条件和温度状态下,都能够准确估计伺服系统的摩擦力矩。

5 结 论

为满足高端加工、高端测量等行业对机械伺服系统的高精度、高性能需求,本文提出了一种反映温度因素的摩擦建模方法。首先分析了温度通过压力、黏度对摩擦的影响,并结合修正黏性摩擦的 LuGre 模型,分析该模型各参数与温度之间的关系;然后,利用神经网络良好的非线性处理能

力,并根据工程应用的快速性需要,提出采用单隐层 BP 神经网络来描述各随温度变化的参数;再设计实验,通过训练得到神经网络的结构参数,进而建立了反映温度因素的摩擦模型;最后,通过实验验证了模型对摩擦的估计能力。实验结果表明,建立的摩擦模型,对伺服系统摩擦力矩的最大相对估计偏差小于 2.5%。本文的方法能够准确得到适合不同温度状态的摩擦模型,为利用该模型进行实时在线的摩擦补偿提供了条件。

参考文献:

- [1] 向红标,裘祖荣,李醒飞,等. 精密实验平台的非线性摩擦建模与补偿[J]. 光学精密工程,2010,18(5):1119-1127.
XIANG H B, QIU Z R, LI X F, *et al.*. Nonlinear friction modeling and compensation of high-precision experimental platforms[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1119-1127. (in Chinese)
- [2] 卢礼华,郭永丰,大刀川博之,等. 高增益 PID 控制器实现纳米定位[J]. 光学精密工程,2007,15(1):63-68.
LU L H, GUO Y F, TACHIKAWA, *et al.*. High-gain PID controller for nanometer positioning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(1):63-68. (in Chinese)
- [3] AHN J, CHUNG S. Real-time estimation of the temperature distribution and expansion of a ball screw system using an observer [J]. *roceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2004, 218(12): 1667-1681.
- [4] 陈诚,裘祖荣,李醒飞,等. 伺服系统中滚珠丝杠的温度场模型[J]. 光学精密工程,2011,19(5):1151-1158.
CHEN CH, QIU Z R, LI X F, *et al.*. Temperature field model of ball screws used in servo systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1151-1158. (in Chinese)
- [5] 谭文斌,李醒飞,向红标,等. 应用稳态误差分析辨识 LuGre 模型参数[J]. 光学精密工程,2011,19(3):664-671.
TAN W B, LI X F, XIANG X B, *et al.*. Parameter identification of LuGre model based on analysis of steady state error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):664-671. (in Chinese)
- [6] CANUDAS C. A new model for control of systems with friction[J]. *IEEE Tran. on Automatic Control*, 1995,40(3):419-425.
- [7] CANUDAS C. Comments on "a new model for control of systems with friction"[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(8): 1189-1190.
- [8] FELIX J L P, BALTHAZAR J M, BRASIL R M L, *et al.*. On LuGre friction model to mitigate nonideal vibrations [J]. *Journal of Computational and Non-linear Dynamics*, 2009,4(3):34-53.
- [9] 于伟,马佳光,李锦英,等. 基于 LuGre 模型实现精密伺服转台摩擦参数辨识及补偿[J]. 光学精密工程,2011,19(11):2736-2743.
YU W, MA J G, LI J Y, *et al.*. Friction parameter identification and friction compensation for precision servo turning table [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2736-2743. (in Chinese)
- [10] 谭文斌,李醒飞,向红标,等. 修正黏性摩擦的 LuGre 模型的摩擦补偿[J]. 天津大学学报,2012,45(9):824-828.
TAN W B, LI X F, XIANG H B, *et al.*. Friction compensation based on LuGre model with modified viscous friction [J]. *Journal of Tianjin University*

- ty, 2012, 45(9):824-828. (in Chinese)
- [11] ZHAO Z Y, XIE W F, RAD A B. A cascaded fuzzy model of friction over large temperature variation[C]. *Proc. of Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, Washington D C: IEEE Computer Society Press, 2006:160-165.*
- [12] MARTON L, LANTOS B. A novel approach to deal with temperature dependence of friction in mechanical control systems [C]. *Proc. of 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Washington D C: IEEE Computer Society Press, 2010:920-925.*

作者简介:



谭文斌(1984—),男,湖南衡阳人,博士后,2006年、2008、2012年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事控制技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail:twb@tju.edu.cn



李醒飞(1966—),男,湖北天门人,教授,博士生导师,2000年于天津大学获得博士学位,2003赴美国密歇根大学学习和工作,主要从事多传感器融合技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail:lixf@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)