

文章编号 1004-924X(2011)11-2736-08

基于 LuGre 模型实现精密伺服转台 摩擦参数辨识及补偿

于 伟^{1,2,3,4*}, 马佳光^{1,2}, 李锦英^{1,2,3}, 肖 靖⁴

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院 光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4. 徐州空军学院, 江苏 徐州 221000)

摘要:为降低摩擦对光学精密伺服转台速度跟踪精度的影响,提出了基于 LuGre 模型的转台摩擦参数辨识和补偿方法。首先,分析转台在自由减速过程中的速度过零现象,采用遗传算法拟合减速曲线从而获得转台摩擦参数和转动惯量;然后,通过仿真实验验证辨识方法;最后,利用辨识得到的参数计算摩擦补偿并叠加到转台速度伺服系统。实际实验系统的数据更新率达 1 kHz,已实现了速度-电流双闭环控制。实际拟合实验中,拟合与实测速度曲线的误差均方差为 2.9×10^{-3} rad/s;速度跟踪实验中,对于幅值为 0.032 4 rad/s,频率为 0.5 Hz 的给定正弦信号,摩擦补偿消除了波形失真,系统速度跟踪误差的均方差减少 27%。实验表明,用该方法测量转台摩擦参数精确度高,基于辨识参数的摩擦补偿可提高光学伺服转台低速低频段的速度跟踪精度。

关键词:伺服转台;LuGre 模型;参数辨识;摩擦补偿;转动惯量

中图分类号:TP273; **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2736

Friction parameter identification and friction compensation for precision servo turning table

YU Wei^{1,2,3,4*}, MA Jia-guang^{1,2}, LI Jin-ying^{1,2,3}, XIAO Jing⁴

(1. Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Key Laboratory of Beam Control of Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

4. Xuzhou Air Force College, Xuzhou 221000, China)

* Corresponding author, E-mail: yuwei2005@yeah.net

Abstract: To decrease the influence of friction on the angular speed tracking accuracy of a precision servo turning table, the methods of friction parameter identification and friction compensation based on the LuGre model was put forward. Firstly, the angular speed over zero phenomenon occurred in the angular speed free reduction was analyzed, and the genetic algorithm was used to fit the angular

收稿日期:2011-05-03;修订日期:2011-06-21.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA8020205)

speed reduction curve to obtain LuGre model parameters and rotational inertia. Then, the parameter identification method was tested and verified by a simulation experiment. Finally, the friction compensation was computed by identification parameters and was added to the angular speed tracking system of the turning table. The actual experimental system achieves a angular speed loop and a current loop and its data update rate is 1 kHz. In the actual angular speed measuring experiment, the mean square deviation of error between actual angular speed curve and fitting curve is 2.9×10^{-3} rad/s. In the angular speed tracking experiment, when the given signal is sine wave with an amplitude of 0.032 4 rad/s and frequency of 0.5 Hz, friction compensation can eliminate the waveform distortion, and the mean square deviation of angular speed tracking error has decreased by 27% as compared with that of double loops control system without friction compensation. It is concluded that the friction parameter identification method can obtain high accurate parameters, and can improve the angular speed tracking accuracy of servo turning tables prominently.

Key words: turning table; LuGre model; parameter identification; friction compensation; rotational inertia

1 引 言

在高精度光学转台伺服系统中,摩擦对系统低速性能影响很大^[1],必须对其进行补偿才能提高转台伺服系统的速度跟踪精度。基于模型参数已知的摩擦补偿由于速度快,具有预见性已成为最为重要的一种补偿方式^[2],实现这一补偿,首先要对摩擦模型进行离线辨识。

近年来,随着摩擦研究的深入,出现了许多新的摩擦模型^[3-4],其中 LuGre 模型是一种比较完善且容易实施的摩擦模型,该模型通过引入刚鬃模型采用 6 个参数可精确地诠释了摩擦力的绝大部分特性^[5]。文献[6]利用速度和行程位置信号作为输入信号,用遗传算法对该 LuGre 模型的动静态参数进行辨识。文献[7]利用电机匀速和自由减速两种状态的电流和转速变化曲线辨识摩擦模型的静态参数,但没有对动态参数进行辨识。文献[8]通过精确测量摩擦预滑阶段的摩擦力和角位移,采用频域辨识方法获取动态参数。文献[9]则采用遗传算法,把控制力作为目标函数逼近值,分两步来辨识出 LuGre 模型的参数,即先由 Stribeck 曲线辨识静态参数,再利用伺服系统输出的位移以及输出的控制力直接辨识动态参数,但该方法需要已知伺服系统的质量或转动惯量。

摩擦的补偿常见有两种情况:基于模型的摩擦补偿和非模型的摩擦补偿。基于模型的补偿又可以分为参数已知的补偿^[10]和参数未知的补偿。参数已知的摩擦补偿,利用固定模型对计算摩擦,

输出数据的更新率高,但接触面发生变化导致摩擦模型变化时往往会出现较大偏差。参数未知的补偿多采用观测器在线辨识的方法对摩擦自适应补偿^[11-12],这种补偿有一定的自适应能力,但是运算量大,辨识时间长,目前多数还停留在理论分析和仿真实验阶段,投入实用较少。非模型的摩擦补偿多数是把摩擦当作是一种非线性扰动,采用鲁棒方法稳定输出^[13]。还有一种不依赖于摩擦模型的摩擦补偿方法是在系统中增加加速度环,唐涛等人采用这种方法对摩擦的非线性扰动作用进行抑制,提高了转台的低速跟踪性能^[14]。

本文分析了转台在摩擦作用下的自由减速过程中的转速曲线过零现象。结合文献[7]的摩擦参数和转动惯量一体化测量方法以及文献[9]的参数辨识方法,以转速变化为目标函数,通过遗传算法拟合出 LuGre 动态参数。由于转台在旋转过程中接触面摩擦变化较小,故采用固定模型对摩擦进行补偿。

2 电机自由减速过程中的速度过零现象及其分析

根据文献[7]的方法,测量了由直流力矩电机驱动的某型转台摩擦参数,将电机电压输入端开路,使其在摩擦作用下自由减速,测量转速变化曲线。在测量过程中,发现转台速度衰减到零后并未立即停止,而是继续减速出现一个反向速度再振荡衰减到零。图 1 所示即为速度过零现象。依据电机工作原理建立图 2 所示的等效电路及仿真模型,理论分析和模型仿真显示,摩擦的滞后特性

(Friction lag)^[4]引起了速度过零振荡。比较目前应用较为广泛的几种摩擦模型,发现 LuGre 模型吸收了 Stribeck 模型对 Stribeck 效应的描述, Dahl 模型中平均变形的概念、以及鬃毛模型的特点^[4],可以较好地解释速度为 0 时摩擦力不为 0 的

现象。在速度接近 0 时,由于刚鬃形变依旧存在,由刚鬃形变所储存的一部分势能需要释放,所以摩擦力不为 0。摩擦力继续做功,导致速度过零。借助这一速度过零现象包含的微观弹性力信息,就可以求解 LuGre 模型的动力参数。

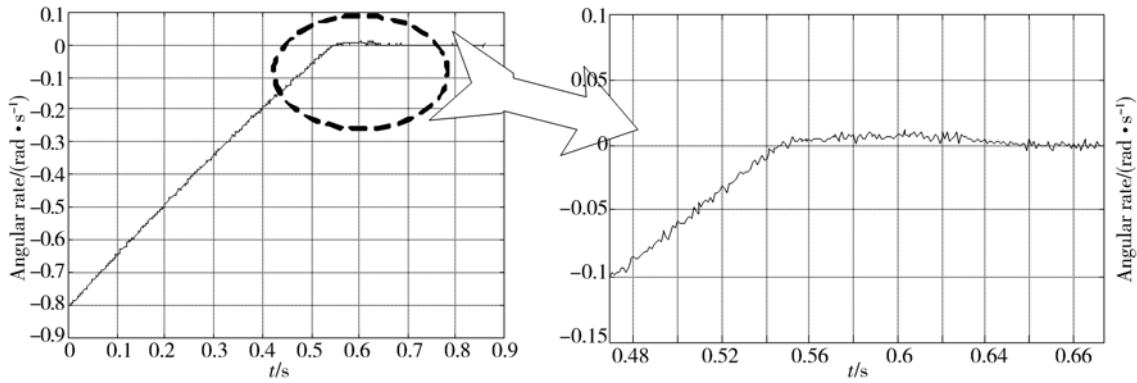
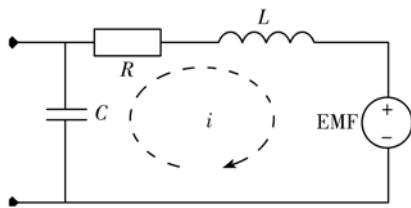


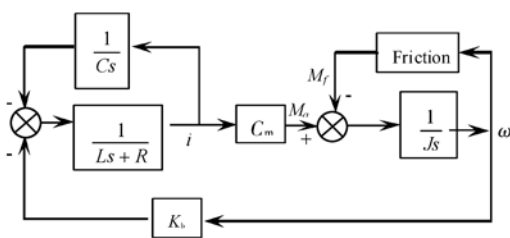
图 1 转台自由减速过程中的速度过零现象及其局部放大

Fig. 1 Angular speed over zero phenomenon occurring in angular speed free reduction for turning table and its part blowup



(a) 直流力矩电机自由减速过程等效电路

(a) Equivalent circuit of DC torque motor during angular speed free reduction



(b) 直流力矩电机自由减速过程仿真框图

(b) Simulation model of DC torque motor during angular speed free reduction

图 2 直流力矩电机自由减速过程等效电路及其仿真框图

Fig. 2 Equivalent circuit and simulation model of DC torque motor during angular speed free reduction

LuGre 模型的角速度-摩擦力矩关系曲线如图 3 所示,其公式描述:

$$\frac{dz}{dt} = \omega - \sigma_0 \frac{|\omega|}{g(\omega)} z, \quad (1)$$

$$M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \omega, \quad (2)$$

$$g(\omega) = M_c + (M_s - M_c) e^{-(\omega/\omega_s)^2}, \quad (3)$$

上式中, z 为刚鬃平均形变, ω 为刚鬃相对角速度, M_f 为摩擦力矩, M_c 为库仑摩擦力矩, M_s 为最大净摩擦力矩, ω_s 为 stribeck 角速度, σ_0 为鬃毛刚

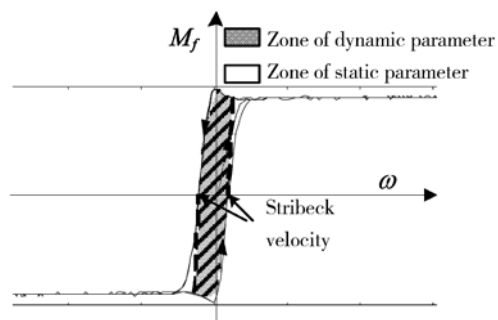


图 3 LuGre 摩擦模型中角速度与摩擦力矩的关系

Fig. 3 Friction torque as a function of angular rate for LuGre's model

度, σ_1 为微观阻尼系数, σ_2 为粘滞摩擦系数。上述表达式中, $\omega_s, M_s, M_c, \sigma_2$ 称为静力参数; σ_0, σ_1 称为

动力参数。

对于精密转台而言,固定部分和转动部分间的接触面为半径较小的环形接触面,从制造工艺和加工精度而言,这个接触面的摩擦性质较为一致,可以认为各个角位置处 LuGre 模型的摩擦参数保持不变,因而可以在一个连续的减速过程中对这些固定的摩擦参数进行辨识。如果在减速行程内接触面材料,粗糙度发生变化引起摩擦参数变化较大;或者摩擦阻尼系数较大,能量衰减过快不能出现过零振荡现象,则无法利用自由减速曲线中的速度过零现象进行摩擦参数辨识。

3 基于遗传算法的转台摩擦模型、转动惯量辨识和补偿方法

LuGre 模型是带微分方程的复杂非线性函数,对于辨识参数而言,按常规方法选取的评价函数容易存在多个局部极值点;而传统参数辨识方法大多数基于梯度估计,容易陷入局部极值,很难准确得到 LuGre 模型的全部参数。遗传算法模拟了生物种群遗传和进化过程中的选择、交叉和变异等机理进行最优解的自适应搜索,因其达到全局最优解的能力,可以避免陷入局部极值的陷阱。

3.1 辨识过程

辨识过程分为两步。第一步基于一般辨识方法的静态参数辨识;第二步基于遗传算法的动态参数及转动惯量的辨识。

第一步,在电机力矩系数 C_m 已知的情况下,对其做速度闭环控制,测量转速 ω , 电流 i_a 的变化曲线。当转速满足 $\omega/\omega_s \gg 1$ 情况下,电机电流和转速的关系满足:

$$C_m \cdot i_a = M_c + \sigma_2 \cdot \omega, \quad (4)$$

至少测量两组速度-电流变化曲线即可求出 M_c 和 σ_2 。

第二步,在电机开路端等效电路参数 R, L, C 以及反电势系数 K_b 已知的情况下,将电机输入电压开路,测量仅有摩擦作用下的自由减速曲线,定义为 $\omega_0(t)$ 。以 $\omega_s, M_s, \sigma_0, \sigma_1$ 以及电机转动惯量 J 为输入变量,以时间 t 为自变量,定义拟合参数速度变化曲线为 $\omega([\omega_s, M_s, \sigma_0, \sigma_1, J], t)$ 。该曲线的产生,依赖于以下两个方程:

$$0 = \frac{1}{C} \int i_a dt + Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + K_b \omega, \quad (5)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_m \cdot i_a - M_t. \quad (6)$$

以实测自由减速曲线和拟合参数自由减速曲线的相似程度作为参数拟合的依据,以二者的方差作为评价函数 e :

$$e = \int_t [\omega_0(t) - \omega([\omega_s, M_s, \sigma_0, \sigma_1, J], t)]^2 dt. \quad (7)$$

3.2 基于遗传算法的辨识过程仿真

为验证辨识过程的有效性,利用仿真实验检验拟合参数与原参数的吻合度。

建立系统速度闭环控制仿真模型。该模型中驱动电机输入端等效电容为 $1.316 \mu F$ 、电感为 $21.75 mH$ 、输入电阻为 8.5Ω 、反电势系数为 $5.48 V/(rad/s)$ 、力矩系数为 $6.856 N \cdot m/A$ 、库伦摩擦力矩 $2646.856 N \cdot m$ 、粘滞摩擦系数为 0.7 ,其他摩擦参数见表 1 第一行。

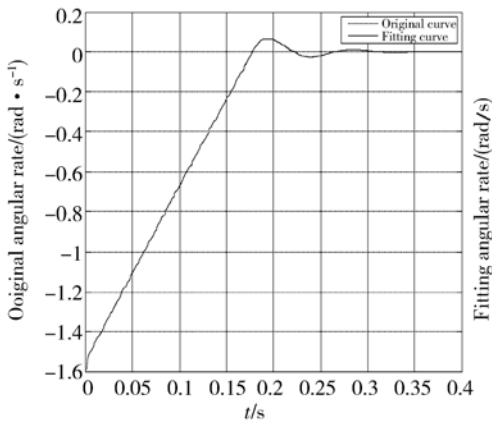
第一步,利用该模型产生电机匀速运动时的速度、电流变化曲线,根据公式(4)求解 M_c 和 σ_2 。

第二步,在 MATLAB 中使仿真系统做自由减速运动,记录速度变化曲线,导入根据公式(7)编写的评价函数文件。打开最优化工具箱,选择遗传算法,设置变量数为 5,种群类型为双精度浮点数组成的向量,初始种群 20 个,最大世代 200,根据实际经验对变量限制范围,如所有的系数 $> 0; M_s > M_c; J$ 可根据机械设计结构确定范围; $-\omega_s \sim \omega_s$ 区域是摩擦动力学参数作用的主要区域,因此由减速曲线可以判定 ω_s 范围,辨识结果如表 1 所示。Stribeck 角速度 ω_s 误差百分比最大,为 5.4% ;转动惯量的误差百分比为 0% 。辨识参数产生的自由减速曲线与原始曲线的比较见图 4,由图中可以发现拟合参数获得的自由减速曲线与原始曲线基本重合,最大误差在 $10^{-4} rad/s$ 量级。

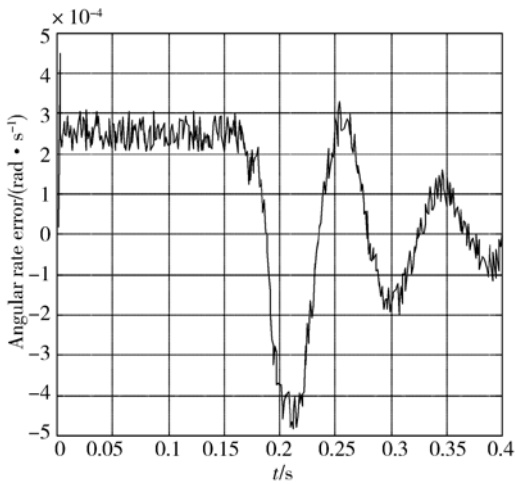
表 1 原始参数和辨识参数比较

Tab. 1 Comparison between original parameter and identified parameter

	$\omega_s/(rad \cdot s^{-1})$	$M_s/(N \cdot m)$	$\sigma_0/(N \cdot mrad^{-1})$	$\sigma_1/N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$	$J/(kg \cdot m^2)$
原始参数	0.05	3.88	1600	10	0.31
辨识参数	0.0473	4.0378	1605.7793	10.0791	0.31
误差	5.4%	4.067%	0.3612%	0.791%	0%



(a) 仿真实验中自由减速过程的角速度原始曲线与拟合曲线
 (a) Angular speed original curve and fitting curve during angular speed free reduction in simulation experiment



(b) 仿真实验中角速度原始曲线与拟合曲线误差
 (b) Error between original curve and fitting curve in simulation experiment

图 4 仿真实验中原始曲线与拟合曲线比较

Fig. 4 Comparison between original curves and fitting curves in simulation experiment

3.3 模型参数已知的摩擦补偿方法

对于摩擦参数已知的精密伺服转台,以角速度为输入变量,利用 LuGre 模型计算每个时刻的摩擦力矩,将其作为前馈施加到伺服转台的控制力矩中。施加摩擦补偿的系统结构如图 5 所示,具体步骤如下:

第一步,离线情况下,测量控制器输出 u 和控制力矩 M 之间的函数关系: $M=P(u)$ 。对于已经施加了电流闭环控制的系统,在工作频段内,电压 u 和电流 i 的关系近似于常数。设 $k_i=i/u$,此时 $M=C_m k_i u$ 。

第二步,在线情况下,利用已辨识的摩擦参数和转台角速度 ω 实时计算摩擦力矩 M_f 。

第三步,在速度环控制器的输出上叠加 $u_f=P^{-1}(M_f)$ 。对于存在电流环的闭环控制系统 $u_f=\frac{M_f}{C_m k_i}$ 。

4 实际系统的摩擦参数辨识和补偿实验

以某实验型光学精密伺服转台为研究对象。该转台内安装有永磁直流力矩电机,基座固定,转动部分与基座接触面直径为 72 mm。实测电机输入端等效电容 1 pF,电感为 17.15 mH,输入电阻为 13.65 Ω 。转台部分转动惯量为 0.2~0.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,电机反电势系数为 0.91 $\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$,力矩系数为 3.478 $\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$ 。已经实现了速度闭环和电流闭环控制,具有较高的角速度伺服刚度。角速度由速率陀螺 CS-ARS-12 获得,采样率为 100 Hz,量程为 $\pm 80(^{\circ})/\text{s}$,分辨率为 0.01 $(^{\circ})/\text{s}$ 。信号采集和电机控制由 DMM16T 采集板+PC104/SPD2C 嵌入式系统完成,电流信号采集使用霍尔传感器 LP-50A,所有数据采集频率为 1 kHz。

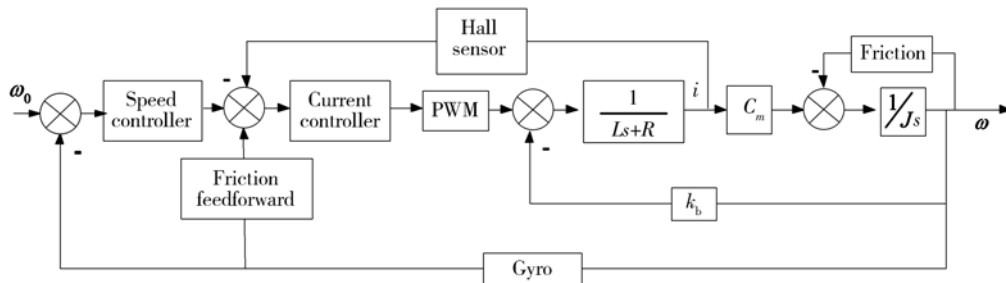


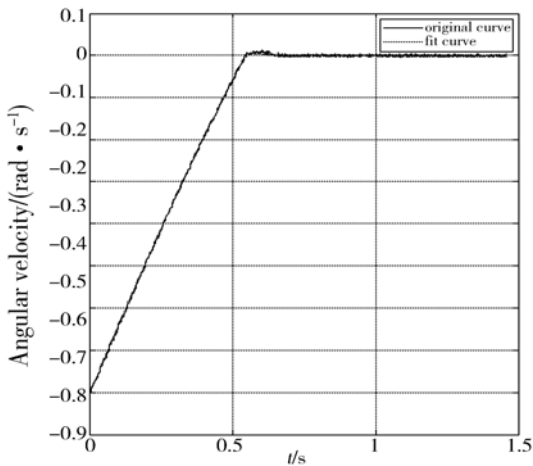
图 5 速度-电流双闭环伺服系统中摩擦补偿

Fig. 5 Friction compensation in speed-current double loop serve system

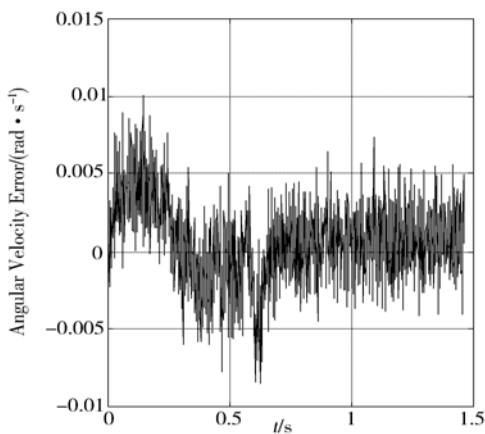
4.1 摩擦参数辨识实验

按照 3.1 中步骤一,在速度闭环的情况下实测几组转速和电流的变化曲线,依据公式(4)求解 $M_c=0.6 \text{ N}\cdot\text{m}, \sigma_2=0.207 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

按照 3.2 中步骤二,测量转台在摩擦作用下自由减速过程的速度变化曲线,并对参数进行拟合。测得 $M_s=0.01 \text{ N}\cdot\text{m}, \sigma_1=0.419 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}), \sigma_0=1000 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}, \omega_s=0.01345 \text{ rad/s}, J=0.4618 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。辨识参数获得的减速曲线与原减速曲线的比较及误差如图 6 所示,误差的均方差为 $2.9\times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 。



(a) 自由减速过程角速度变化实测曲线及拟合曲线
(a) Angular speed actual curve and fitting curve in angular speed free reduction experiment



(b) 角速度变化实测曲线及拟合曲线间的误差
(b) Error between actual curves and fitting curves in experiment

图 6 自由减速过程角速度变化实测曲线及拟合曲线比较

Fig. 6 Comparison between actual curve and fitting curve during angular speed free reduction experiment

4.2 摩擦补偿实验

因转台基座和转动部分接触面半径较小,而 LuGre 模型中刚鬃作用距离相对固定,所以对比

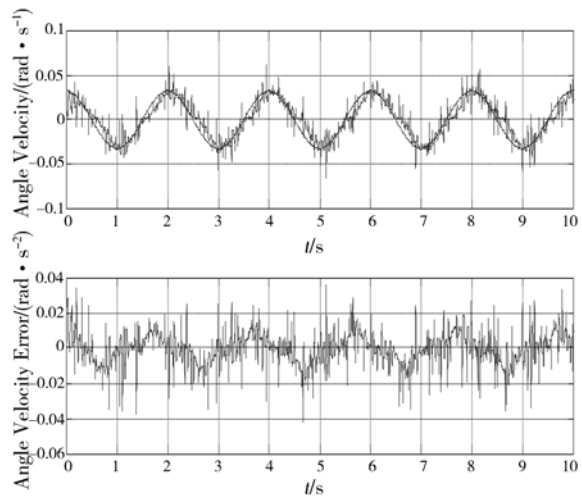


图 7 未摩擦前馈时,速度-电流双闭环系统速度跟踪效果

Fig. 7 Tracking effect of double loop angular speed serve system without friction compensation

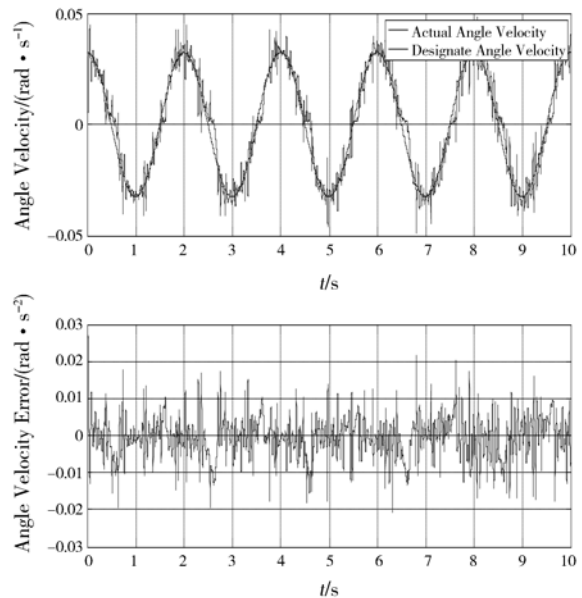


图 8 施加摩擦前馈后,速度-电流双闭环系统速度跟踪效果

Fig. 8 Tracking effect of double loop angular speed serve system with friction compensation

一些半径较大的大型光电跟踪设备,该光学伺服转台的 stribeck 速度相对较高。选择摩擦非线性较为严重的 stribeck 速度附近区域,检验摩擦补

偿的效果。根据上节辨识得到的 ω_s 实测值,速度给定信号选用正弦信号,幅值为 0.032 4 rad/s,频率为 0.5 Hz。

未采用摩擦前馈时,双闭环系统速度及误差变化曲线如图 7 所示,存在波形失真,速度误差均方根为 0.007 7 rad/s。采用 3.3 介绍的方法进行摩擦前馈补偿后,速度及误差变化曲线如图 8 所示,无波形失真,速度误差均方根 0.005 6 rad/s。二者比较误差均方根下降 27%。

5 结 论

本文首先通过对精密伺服转台做速度闭环

控制获取电机的库仑摩擦和黏滞摩擦系数,然后采用遗传算法对自由减速曲线进行拟合,辨识得到摩擦的静力参数,并通过仿真实验验证该方法获取辨识参数的可行性。在某转台系统上进行了实验验证,实验验证实测曲线与拟合曲线的误差在 10^{-3} rad/s 量级。以低频低速正弦速度信号作为给定,利用辨识参数计算了摩擦补偿并叠加到驱动输入。对比已经实现速度-电流双闭环系统的速度跟踪曲线,结果显示,增加摩擦补偿后,速度误差的均方差减少了 27%。该摩擦参数辨识方法及对应的固定模型摩擦补偿方法对提高光学伺服系统的速度跟踪能力有较明显的效果。

参考文献:

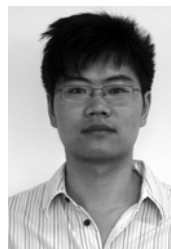
- [1] 汪达兴,杜福嘉. 大型天文望远镜摩擦传动系统低速特性的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2), 274-278.
WANG D X, DU F J. Ultra-low speed research on friction driver for astronomical telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2), 274-278. (in Chinese)
- [2] 谭文斌,李醒飞,向红标,等. 应用稳态误差分析辨识 LuGre 模型参数[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3):664-671.
TAN W B, LI X F, XIANG H 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)
- [3] 原大宁,刘丽兰,刘宏昭,等. 滑动摩擦模型研究现状[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(4):1142-1147.
YUAN D N, LIU L L, LIU H ZH, *et al.* Progress of pre-sliding friction model[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(4):1142-1147. (in Chinese)
- [4] 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.
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)
- [5] WIT C C, OLSSON H, ASTROM K J. A new model for control of systems with friction [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(3):419-425.
- [6] 向红标,袁祖荣,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 platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1119-1127. (in Chinese)
- [7] 胡浩军,毛耀,马佳光,等. 稳定转台摩擦参数的测量及其对稳定精度的影响[J]. 光电工程, 2007, 34(5):5-9.
HU H J, MAO Y, MA J G, *et al.* Stabilized turntable friction parameters measurement and the effect on the stabilized accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 34(5):5-9. (in Chinese)
- [8] 李拥军. 光电跟踪系统低速平稳性技术研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2009.
Li Y J. *Study on the low-velocity stability of opto-electronic tracking system* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, 2009. (in Chinese)
- [9] 孙洪鑫,王修勇,陈政清. 基于改进遗传算法的 LuGre 模型参数辨识[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(23):113-117.
SUN H X, WANG X Y, CHEN Z Q. Parameter identification of LuGre model with improved genetic algorithms [J]. *Journal of Wuhan University Of Technology*, 2009, 31(23):113-117. (in Chinese)
- [10] 姚建勇,焦宗夏. 改进型 LuGre 模型的负载模拟器摩擦补偿[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(7):812-815.
YAO J Y, JIAO Z X. Friction compensation for hydraulic load simulator based on improved LuGre

- friction mode[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(7): 812-815. (in Chinese)
- [11] 于志伟,曾鸣,乔大鹏. 采用复合控制的直流力矩电机摩擦补偿[J]. *电机与控制学报*, 2008, 12(5): 539-544.
- YU Z W, ZENG M, QIAO D P. Complex control for friction compensation in DC motors[J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(5): 539-544. (in Chinese)
- [12] 王忠山,苏宝库,王毅,等. 基于观测器/滤波器结构的高精度转台自适应摩擦补偿[J]. *南京航空航天大学学报*, 2008, 25(2): 113-120.
- WANG Z S, SU B K, WANG Y. Observer/filter structure based adaptive friction compensation for high precision turntable [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2008, 25(2): 113-120. (in Chinese)
- [13] 刘强,尔联洁,刘金琨. 参数不确定机械伺服系统的鲁棒非线性摩擦补偿控制[J]. *自动化学报*, 2003, 29(4): 628-632.
- LIU Q, ER L J, LIU J K. Robust nonlinear friction compensation of mechanical servo system with time variable parameter [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(4): 628-632. (in Chinese)
- [14] 唐涛. 加速度计反馈在高精度跟踪控制系统中的应用研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2009.
- TANG T. *Acceleration feedback control for high precision tracking control*[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, 2009. (in Chinese)

作者简介:



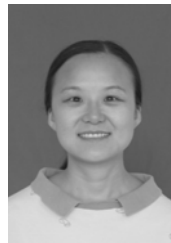
于 伟(1975—)男,山东郓城人,博士研究生,讲师,1999年、2004年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士学位,现主要从事光束控制技术研究. E-mail: yuwei2005@yeah.net



李锦英(1984—)男,江苏连云港人,博士研究生,2007年于中国科技大学获学士学位,现从事运动控制技术研究. E-mail: jyliok@gmail.com



马佳光(1941—)男,辽宁沈阳人,研究员,博士生导师,1964年于大连工学院获学士学位,主要从事光电系统总体技术,光电捕获跟踪技术等方面的研究. E-mail: mjg@ioe.ac.cn



肖 靖(1978—)女,江苏徐州人,讲师,1999年于南京化工大学获学士学位,2006年于成都理工大学获硕士学位,现从事遥感图像应用技术的研 究. E-mail: Elizabeth-yu@yeah.net

(本栏目编辑:李自乐)