

文章编号 1004-924X(2019)01-0121-08

精密定位系统的摩擦力建模与补偿

马立*, 王敬萍, 李丰甜, 曾佑轩, 刘志龙
(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 为了提高由直线电机驱动的精密定位系统的定位精度, 建立了优化 Stribeck 摩擦模型, 对摩擦力这一影响定位精度的主要因素进行补偿。首先, 对于传统的 Stribeck 摩擦模型进行优化, 采用改进的最小二乘算法对模型参数进行辨识。然后, 对所建立的摩擦模型补偿算法进行仿真并与扰动观测器的补偿算法进行比较, 发现前者速度比后者速度在补偿后提高了 4.33%, 对摩擦力具有更好的补偿效果。最后, 在大行程二维精密定位平台上进行验证, 根据平台能够达到的最大速度定义 0.005 m/s 为低速运动, 0.05 m/s 为高速运动, 在这两种速度下进行实验, 并与基于库仑摩擦前馈补偿模型比较。实验结果表明: 精密定位平台在速度为 0.005 m/s 的低速运动时, 优化模型的跟随误差减小了 67.67%; 在速度为 0.05 m/s 的高速运动时, 优化模型的跟随误差减小了 51.63%, 验证了优化 Stribeck 摩擦模型补偿算法的有效性。本文提出的优化 Stribeck 摩擦模型可用于提高由直线电机驱动的精密定位系统的定位精度。

关键词: 驱动控制; Stribeck 摩擦模型; 参数辨识; 摩擦力补偿

中图分类号: TP273; TH117 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192701.0121

Friction modeling and compensation of precision position system

MA Li*, WANG Jing-ping, LI Feng-tian, ZENG You-xuan, LIU Zhi-long

(School of Mechatronic Engineering and Automation,
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding author, E-mail: malian@shu.edu.cn

Abstract: To improve the positioning accuracy of a precise positioning system driven by a linear motor, the optimized Stribeck friction model was established that compensates for the main factors affecting the positioning accuracy of friction. First, the traditional Stribeck friction model was optimized. Second, the improved least square algorithm was used to identify the model parameters. Third, the friction model compensation algorithm was simulated and compared with the disturbance observer compensation algorithm. It is found that the speed of the former is 4.33% higher than that of the latter, and the friction compensation has a better compensation effect. Finally, the experiment was carried out on a two-dimensional precision positioning platform with large stroke according to the maximum speed of the platform; low and high speeds were defined as 0.005 and 0.05 m/s, respectively. Experiments were performed at these two speeds and compared with the Coulomb friction feed forward compensation model. The experimental results indicate that for the precision positioning platform at a low speed of 0.005 m/s, the proposed model tracking error is reduced by 67.67%; for a

收稿日期: 2018-05-02; **修订日期:** 2018-06-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61573238); 上海市自然科学基金资助项目(No. 13ZR1415800); 上海市教育委员会科研创新基金资助项目(No. 14YZ008)

high-speed movement of 0.05 m/s, the proposed model tracking error is reduced by 51.63%, which verifies the validity of the improved Stribeck friction model compensation algorithm. The improved Stribeck friction model proposed in this paper can be used to improve the positioning accuracy of a precision positioning system driven by a linear motor.

Key words: driving control; Stribeck friction model; parameter identification; friction compensation

1 引言

大行程二维精密定位平台是精准定位和曲线跟踪伺服系统,评价该伺服系统性能的主要标准是定位精度和重复定位精度。对于高精度伺服系统来说,摩擦力是影响系统精度的主要因素。摩擦力的非线性特性使得系统难于精确控制,特别是在低速运动时会出现低速爬行现象,降低系统的定位精度,同时在高速运动时会使系统产生较大的跟随误差。因此,高精度定位系统的摩擦补偿不能忽视^[1]。

近年来,基于摩擦模型的补偿方法成为主流。工程中常见的摩擦模型有两类:静态摩擦模型和动态摩擦模型。静态摩擦模型有库伦摩擦模型^[2]和 Karnopp^[3]摩擦模型等,其中 Stribeck 摩擦模型是应用最为广泛的摩擦模型。王延忠等^[4]以 Stribeck 摩擦模型为基础,通过减小 Stribeck 系数、摩擦因数静动比和外载荷,及增大系统阻尼等方法,提高了系统的稳定性。Cong S 等^[5]通过对 Stribeck 摩擦模型补偿策略的优化,避免了由摩擦力的过度补偿而产生的颤振问题和极限环,提高了系统精度。陈浩等^[6]针对直线电机的摩擦特性,提出了考虑加速度影响的 Stribeck 二元摩擦模型,并验证了其有效性。动态摩擦模型有 Dahl 摩擦模型^[7]、Leuven 摩擦模型和 LuGre 摩擦模型等,其中 LuGre 摩擦模型容易实施且较完善。于伟等^[8]利用 LuGre 摩擦模型,提高了光学伺服转台低速低频段的速度跟踪精度。晋超琼等^[9]提出了一种基于 LuGre 摩擦模型的补偿方法,有效降低了摩擦对航空光电稳定平台视轴精度的影响。郭鹏飞等^[10]将 LuGre 摩擦模型带入到系统数学模型中,将反演控制与滑模控制结合,从而精确补偿摩擦对伺服系统精度的影响。

摩擦力模型参数的辨识精度决定了所选模型的精度,同时也影响摩擦补偿算法的准确度^[11]。静态摩擦模型常用的辨识方法有最小二乘法、遗

传算法等。动态摩擦模型的参数辨识在静态模型的基础上,含有复杂的微分环节等。姜振海等^[12]利用区间分析理论对摩擦模型的参数进行辨识,提高了系统的稳态精度。曾德林等^[13]提出分步夹逼和分步搜索法对 LuGre 模型参数进行初步辨识,然后用遗传算法完成摩擦参数的精确辨识。

本文从大行程二维精密定位平台出发,对系统的摩擦力特性进行研究、分析和补偿。传统的动态模型有多个不可观测状态,在实际应用过程中也会提高系统阶次,且模型的参数辨识方法相对复杂,辨识结果的准确性也无法衡量。与之相比,本文所提出的优化 Stribeck 摩擦模型能够准确地描述精密定位系统的摩擦特性,且提出的改进最小二乘算法具有迭代次数少、收敛快、辨识结果更精确等优点。

2 摩擦模型的建立

2.1 摩擦力数据的获取

本文所提出的摩擦模型是基于面向大幅面纳米压印的大行程二维精密定位平台的,其电控系统如图 1 所示。X、Y 向系统均采用永磁同步无铁心直线电机作为动力源,其中 X 向由两部直线电机实现双驱,达到高推重比且低成本的目的;运动量反馈传感器采用高分辨率的增量式直线光栅尺,X 向两部直线电机配有数字式霍尔传感器,以提高电流换相效率。该平台采用 IMAC 400 运

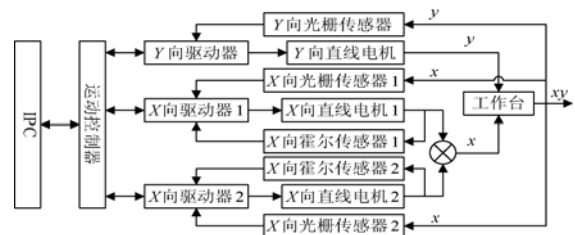


图 1 定位平台的电控系统

Fig. 1 Electronic control system of positioning platform

动控制器,完成速度闭环和位置闭环。运动控制器通过低电平使能驱动器,从而完成电流换相和电流闭环工作。

直线电机驱动的精确定位系统,其摩擦力产生于各滑块与导轨之间的相对运动,难以直接测量和获取,必须通过其它可获取的物理量表征。平台运动过程中的受力情况如式(1)所示:

$$Ma = F_t - F_f - F_l, \quad (1)$$

其中: M 为直线电机末端带动的负载质量, a 为平台在运动过程中的加速度, F_t 为直线电机输出的推力, F_f 为平台在运动过程中所受的摩擦力, F_l 为平台在运动过程中所受的环境等随机扰动。假设平台做匀速运动,此时加速度为 0,忽略环境等随机扰动,式(1)可改写为:

$$0 = F_t - F_f. \quad (2)$$

观察式(2)发现,在平台做匀速运动时,摩擦力的获取可以转变为直线电机输出推力的获取。

整个系统的单轴闭环控制框图如图 2 所示,由图 2 可知直线电机输出的推力如式(3)所示:

$$F_t = K_i K_t V_{out}, \quad (3)$$

其中: K_i 为电流增益, K_t 为电机推力系数, V_{out} 为控制器输出的模拟输出电压。在该系统中 $K_i = 2.5 \text{ A/V}$, $K_t = 68 \text{ N/A}$,因此在不同的匀速状态下,摩擦力可以通过控制器输出的模拟电压来表征。

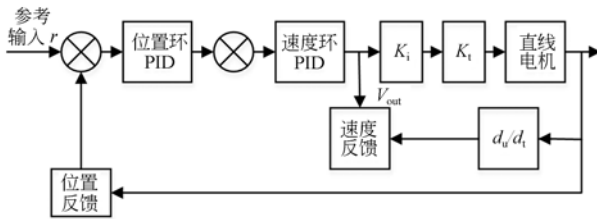


图 2 单轴闭环控制框图

Fig. 2 Block diagram of single-axis closed loop control

2.2 摩擦模型的选择与优化

伺服系统运行时受到的摩擦力,是随速度和位移变化的复杂物理量。为了准确描述各阶段的摩擦特性,需要深入地研究摩擦模型。本文综合模型辨识精度、计算复杂度和实际工程应用考虑,选择 Stribeck 摩擦模型作为研究对象。

Stribeck 摩擦模型表达式为:

$$F(\dot{x}) = [F_c + (F_s - F_c)e^{-\left(\frac{\dot{x}}{v_s}\right)^\delta} + B|\dot{x}|] \text{sgn}(\dot{x}), \quad (4)$$

其中:摩擦力 $F(\dot{x})$ 是速度的单一变量函数, \dot{x} 为平台运动的实时速度, F_s 为最大静摩擦力, F_c 为库伦摩擦力, v_s 为 Stribeck 临界速度, B 为黏滞摩擦系数, δ 为 Stribeck 形状因子(一般取 2)。

考虑整个平台在机械结构装配过程中存在的变形,以及平台运动时运动副间摩擦状态的影响,摩擦力不仅与平台运动速度相关,还与平台运动位置相关。然而,Stribeck 摩擦模型只考虑了摩擦力和速度的关系,忽略了平台运动位置对摩擦力的影响,会降低对于平台摩擦的补偿效果。通过大量实验发现, F_c 和 B 随平台运动位置变化的差值较大。因此,将参数 F_c 和 B 看成是随平台位置变化的函数。由于平台在高速运动时,采集摩擦力相关数据的时间会变短,得不到稳定的电压值,从而无法建模。基于此,经过反复实验,将 F_c 和 B 看成是位移分段函数,分段间隔为 50 mm。所提出的优化 Stribeck 摩擦模型如下:

$$F(\dot{x}, x) = [F_c(x) + (F_s - F_c(x))e^{-\left(\frac{\dot{x}}{v_s}\right)^\delta} + B(x)|\dot{x}|] \text{sgn}(\dot{x}). \quad (5)$$

3 摩擦模型参数辨识算法

3.1 改进的最小二乘辨识算法

摩擦模型补偿控制算法的性能很大程度上取决于模型参数辨识的精确度。因此,选择合适的参数辨识方法是整个算法性能实现的关键。本文提出的改进最小二乘模型辨识算法是基于 Matlab 辨识工具获得的辨识初值进行的。算法前提是:已获得相对准确的模型参数值,由这些参数计算得出摩擦力与实验值之间的差值较小。实验证明,改进的最小二乘法有迭代次数少、收敛快、辨识结果更精确等优点。

改进的最小二乘迭代算法分为以下四步:

第一步:每次迭代的向量 $\Theta_i = (F_{ci}, F_{si}, v_{si}, B_i)$ 包含要辨识的 4 个参数,其中 i 表示迭代次数 ($i \geq 0$, $i=0$ 表示迭代初值), Θ_0 指经过最小二乘算法辨识所得值。将它带入式(4)得:(设平台正向运动 $\dot{x} > 0$)

$$F'_i(v_j) = F_{ci} + (F_{si} - F_{ci})e^{-\left(\frac{v_j}{v_{si}}\right)^\delta} + B_i v_j, \quad (6)$$

其中: j 表示速度的采样点, $1 \leq j \leq n$; $F'_i(v_j)$ 表示

第 i 次迭代时, 根据迭代向量 Θ_i 计算所得的摩擦力。

第二步: 式(7)为辨识所得的摩擦力 $F'_i(v_j)$ 与实验原数据 $F_i(v_j)$ 的差值 $\Delta F_i(v_j)$, 由于该差值很小, 也可以由式(8)表示。

$$\Delta F_i(v_j) = F'_i(v_j) - F_i(v_j), \quad (7)$$

$$\Delta F_i(V_j) = A_{ij} \Delta F_c + B_{ij} \Delta F_s + C_{ij} \Delta v_s + D_{ij} \Delta B_i. \quad (8)$$

F 看成是 4 个待辨识参数的函数, A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} 和 D_{ij} 分别表示为:

$$\begin{cases} A_{ij} = \partial F / \partial F_c |_{(F_c=F_{c_i})} = 1 - e^{-\left(\frac{v_f}{v_s}\right)^2} \\ B_{ij} = \partial F / \partial F_s |_{(F_s=F_{s_i})} = e^{-\left(\frac{v_f}{v_s}\right)^2} \\ C_{ij} = \partial F / \partial v_s |_{(v_s=v_{s_i})} = 2(F_{s_i} - F_{c_i}) e^{-\left(\frac{v_f}{v_s}\right)^2} v_f^2 / v_s^3 \\ D_{ij} = \partial F / \partial B |_{(B=B)} = v_j \end{cases}, \quad (9)$$

其中 A_{ij} 是 F 对 F_c 偏导数在 F_{c_i} 处的值, 依次类推。

将式(9)代入式(8)得到:

$$\Delta F_i(V_j) = \begin{bmatrix} \Delta F_i(v_1) \\ \Delta F_i(v_2) \\ \Delta F_i(v_3) \\ \vdots \\ \Delta F_i(v_j) \\ \vdots \\ \Delta F_i(v_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{i,1} & B_{i,1} & C_{i,1} & D_{i,1} \\ A_{i,2} & B_{i,2} & C_{i,2} & D_{i,2} \\ A_{i,3} & B_{i,3} & C_{i,3} & D_{i,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{i,j} & B_{i,j} & C_{i,j} & D_{i,j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{i,n} & B_{i,n} & C_{i,n} & D_{i,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{c_i} \\ \Delta F_{s_i} \\ \Delta v_{s_i} \\ \Delta B_i \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由此可知, A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} , D_{ij} 和 $\Delta F_i(v_j)$ 均为 $n \times 1$ 维向量。

由式(10)求得 ΔF_{c_i} , ΔF_{s_i} , Δv_{s_i} , ΔB_i 后, 运用式(11)计算出第 $i+1$ 次参与迭代的待辨识参数值 $\Theta_{i+1} = (F_{c(i+1)}, F_{s(i+1)}, v_{s(i+1)}, B_{i+1})$ 。该迭代重复进行, 直到得到较好的辨识结果。

$$\begin{cases} F_{c(i+1)} = F_{c_i} + \Delta F_{c_i} \\ F_{s(i+1)} = F_{s_i} + \Delta F_{s_i} \\ v_{s(i+1)} = v_{s_i} + \Delta v_{s_i} \\ B_{(i+1)} = B_i + \Delta B_i \end{cases}. \quad (11)$$

3.2 参数辨识结果

在所建立的优化摩擦模型中, F_c , F_s , v_s , B 是辨识的目标参数。将平台的整个行程 $-250 \sim$

150 mm 分为 8 段, 其中 F_s , v_s 属于常数辨识, 在 $0 \sim 50$ mm 位移段内可以确定, 而 F_c 和 B 分别需要辨识 8 次。摩擦模型补偿控制算法的性能很大程度上取决于辨识结果的精度, 通过均方根误差 (Re_i) 和测定系数 (R -square) 两个指标来衡量, Re_i 越小, R -square 越大, 则拟合效果越好。其计算公式如下:

$$Re_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (F'_i(v_j) - F_i(v_j))^2}{n}}, \quad (12)$$

$$R\text{-square} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (F'_i(v_j) - F_i(v_j))^2}{\sum_{j=1}^n (F_i(v_j) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (F_i(v_j)))^2}. \quad (13)$$

在 $0 \sim 50$ 位移段内, 以式(14)作为迭代初值进行运算, 迭代结果如表 1 所示。由表 1 可知, 第三次迭代后的 Re_i 值较小且 R -square 值较大, 因此将第三次迭代的结果作为最终的辨识结果。

$$\Theta_0 = (F_{c0}, F_{s0}, v_{s0}, B_0) =$$

$$(3\ 514.300, 5\ 557.300, 0.024, 7\ 266.500). \quad (14)$$

以 $0 \sim 50$ 位移段内为例, 将改进最小二乘辨识算法与传统最小二乘法以及遗传算法进行比较, 结果如表 2 所示。观察表 2 发现, 改进最小二乘辨识算法的 Re_i 值较小且 R -square 值较大。因此, 本文所提出的改进最小二乘辨识算法具有更好的辨识结果, 且迭代次数在 3 时得到最优结果, 收敛速度快, 辨识精度高。

表 1 每次迭代后的值

Tab. 1 Identification parameters for each iteration

| 迭代次数 | Re_i | R -square |
|------|--------|-------------|
| 1 | 0.294 | 0.838 746 |
| 2 | 0.285 | 0.818 736 |
| 3 | 0.209 | 0.964 258 |
| 4 | 0.422 | 0.852 189 |
| 5 | 0.710 | 0.943 580 |
| 6 | 1.330 | 1.679 830 |

表 2 各算法参数辨识比较

Tab. 2 Comparison of identification parameters among different algorithms

| 辨识算法 | R_e | R -square |
|---------|-------|-------------|
| 改进最小二乘法 | 0.209 | 0.964 258 |
| 最小二乘法 | 0.294 | 0.838 746 |
| 遗传算法 | 0.228 | 0.964 258 |

基于改进的最小二乘辨识方法得到各位移区间的参数辨识结果,如表 3 所示。

表 3 参数辨识结果

Tab. 3 Results of parameter identification

| 辨识参数 | 位移区间 | 辨识结果 |
|-------------------------------|--------------------|-------------|
| F_s/mV | $[-250 \sim 150]$ | 5 885.850 0 |
| $\tau_b/(m \cdot s^{-1})$ | $[-250 \sim 150]$ | 0.009 5 |
| F_c/mV | $[-250 \sim -200]$ | 3 592.3 |
| | $[-200 \sim -150]$ | 3 399.7 |
| | $[-150 \sim -100]$ | 3 371.3 |
| | $[-100 \sim -50]$ | 3 328.1 |
| | $[-50 \sim 0]$ | 3 315.0 |
| | $[0 \sim 50]$ | 3 552.3 |
| | $[50 \sim 100]$ | 3 782.5 |
| | $[100 \sim 150]$ | 4 049.0 |
| $B/(mV \cdot m^{-1} \cdot s)$ | $[-250 \sim -200]$ | 6 694.1 |
| | $[-200 \sim -150]$ | 5 989.9 |
| | $[-150 \sim -100]$ | 6 739.1 |
| | $[-100 \sim -50]$ | 6 548.8 |
| | $[-50 \sim 0]$ | 7 084.8 |
| | $[0 \sim 50]$ | 7 205.5 |
| | $[50 \sim 100]$ | 7 442.5 |
| | $[100 \sim 150]$ | 8 701.4 |

4 仿真与实验

4.1 摩擦模型补偿算法的仿真

在摩擦扰动补偿研究中,基于摩擦模型的补偿控制算法和基于扰动观测器(Disturbance Observer, DOB)的扰动补偿算法是常用的两种方法。本节对两种算法进行模拟仿真,来观察它们对于摩擦扰动的补偿性能。

所建立的摩擦模型输入包括:平台实时位移 x , 平台实时速度 \dot{x} , 平台运动方向 $\text{sgn}(\dot{x})$, 模型的输出为辨识得到的摩擦力 $F(\dot{x}, x)$ 。基于此, 本文设计了基于摩擦模型的摩擦补偿器, 如图 3 所示。由图可知, 摩擦补偿器的输出到控制器的输出为 DAC_{out} , 这样避免了对内置伺服环系统电气参数的影响, 只需以线性偏移量的形式叠加到控制器输出端。仿真模型的建立包含位置环和速度环, 观测量为模型的速度输出而非位移输出, 是由于平台运动过程中的定位精度, 即跟随误差的好坏很大程度上取决于速度的跟随精度。

系统仿真模型建立后, 给定一个斜坡信号, 在 200 ms 处加入幅值为 20 的阶跃信号, 其响应曲线如图 4 所示。当加入摩擦扰动之后, 速度立即下降了 9.6%, 证明摩擦力确实会影响速度精度, 从而影响系统的定位精度。加入基于摩擦模型补偿器的速度响应曲线如图 5 放大部分所示, 与不加补偿器相比, 速度会在短时间内快速上升 9.52%。对比图 5 中的曲线发现, 与不加任何补偿相比, 基于 DOB 补偿后速度只提高了 5.19%, 相比基于摩擦模型的补偿, 速度减小了 4.33%。因此, 本文提出的基于摩擦模型的摩擦补偿算法有更好的补偿效果, 有效提高了速度精度以及定位精度。

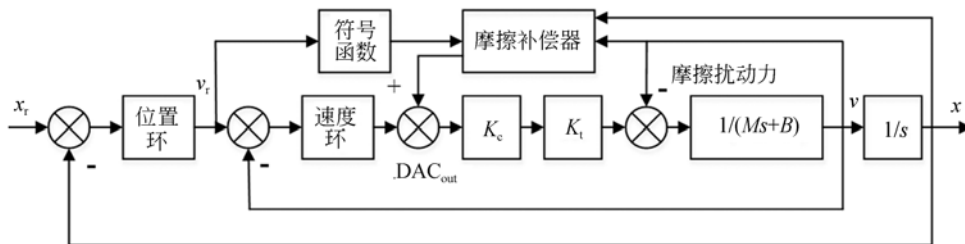


图 3 基于优化摩擦模型的补偿算法框图

Fig. 3 Block diagram of compensation algorithm based on optimal friction model

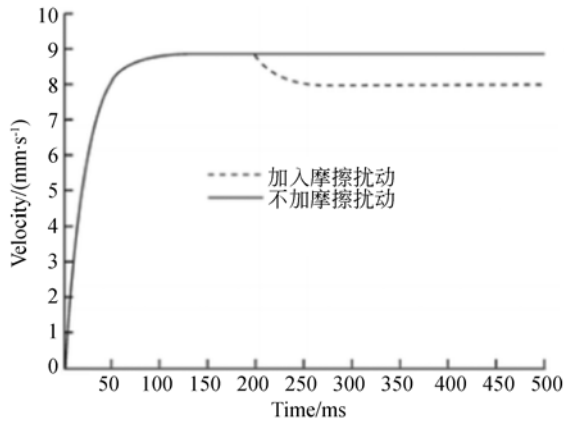


图 4 速度响应对比曲线

Fig. 4 Velocity response contrast curves

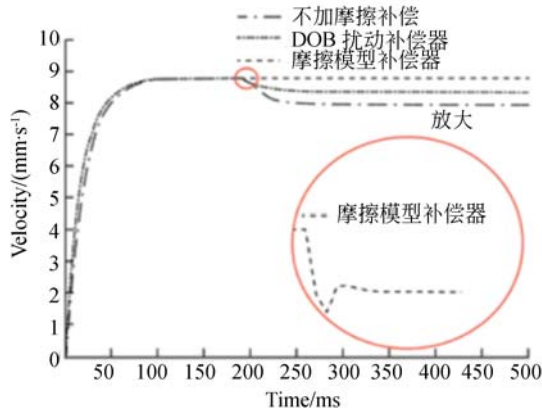


图 5 两种不同算法的速度响应对比曲线

Fig. 5 Contrast of velocity response curves of two algorithms

4.2 精密定位系统的摩擦补偿实验

在面向纳米压印的精密定位平台上,对所建立的优化摩擦模型的补偿算法进行实验验证。平台的实物装置如图 6 所示。平台采用 IMAC 400 运动控制器,该控制器开放了伺服算法功能,通过汇编语言或 PLC 语言来实现。PLC0 与其它 PLC 程序相比,具有更高的中断优先级,且每 3 个伺服周期进入中断一次。因此,计算的摩擦补偿值可以动态地写入控制器的输出中。

实验时,精密定位平台分别以较低速度和较高速度沿着 Y 轴做 0~50 mm 的直线运动,在此时间段内跟随误差是控制器发出的指令位移和实际位移的差值,IMAC 400 控制器在执行平台直线运动的过程中,会自动实时检测平台的跟随误差,通过控制器采集界面就能得到跟随误差随时



图 6 面向纳米压印的大行程二维精密定位平台

Fig. 6 Two-dimensional precision positioning platform for nano-impression

间变化的曲线。

图 7 所示为平台以 0.005 m/s 做匀速直线运动时,分别获得的基于库伦摩擦补偿、传统 Stribeck 摩擦补偿和优化 Stribeck 摩擦补偿后的跟随误差曲线,其跟随误差分别为 10.683, 5.886 和 3.454 μm 。比较跟随误差发现,与基于库伦摩擦补偿相比,优化的 Stribeck 摩擦补偿后的跟随误差减小了 67.67%。

图 8 所示为平台以 0.05 m/s 做匀速直线运

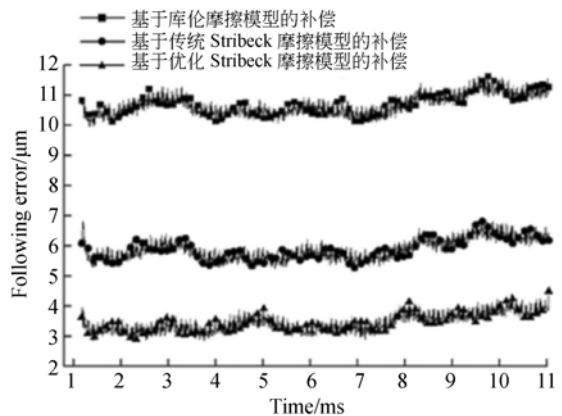


图 7 速度为 0.005 m/s 时的跟随误差对比曲线

Fig. 7 Comparison of following errors of different algorithms at velocity of 0.005 m/s

动时获得的基于库伦摩擦补偿、传统的 Stribeck 摩擦补偿和优化的 Stribeck 摩擦补偿后的跟随误差曲线,其跟随误差分别为 7.803, 6.211 和 3.774 μm 。比较跟随误差曲线发现,与基于库伦摩擦补偿相比,优化的 Stribeck 摩擦补偿后的跟随误差减小了 51.63%。因此,针对不同速度、不同位移段的直线运动,基于优化的 Stribeck 摩擦模型的补偿器在平台匀速运动时,其跟随误差都有一定程度的改善,跟随误差精度的提高代表每个伺服周期的位置跟踪精度提高,最终平台的定位精度得以提高。

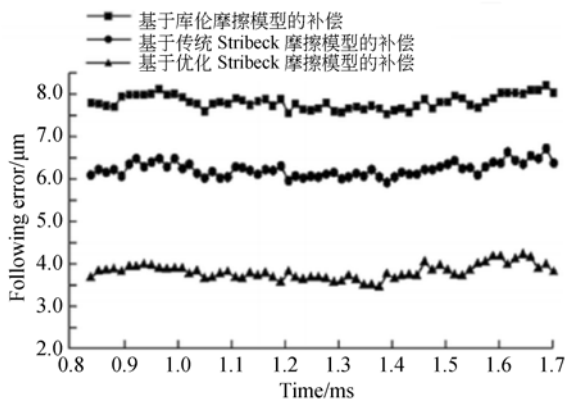


图 8 速度为 0.05 m/s 时的跟随误差对比曲线
Fig. 8 Comparison of following errors of different algorithms at velocity of 0.05 m/s

为了更加全面地验证所提出的摩擦模型补偿算法的可行性,在直线运动的基础上又进行了余弦运动测试。当平台以 0.01 m/s 沿 Y 轴 $-50 \sim 50$ mm 做余弦运动 $y=50 \cos\left(\frac{2x}{18}\right)$ 时,所采集到的实际位移曲线如图 9 所示。将优化的 Stribeck 摩擦模型和库伦摩擦模型进行比较,采集到的跟随误差曲线如图 10 所示。由图 10 可知,当平台处于换向的瞬间,由于速度变化涉及预滑动摩擦,此时的摩擦力与接触面的相对位移相关,而两种模型都未涉及接触面的相对位移,因此,在换向瞬间,优化的 Stribeck 摩擦模型和库伦摩擦模型对于跟随误差的补偿效果都不显著,且两者的数值基本相同。当平台处于非换向时,采用优化的 Stribeck 摩擦模型补偿的跟随误差从 10 μm 下降到了 3 μm ,说明所建立的优化 Stribeck 摩擦模型对于做余弦运动的平台在非换向时的摩擦力改善具有显著的效果。

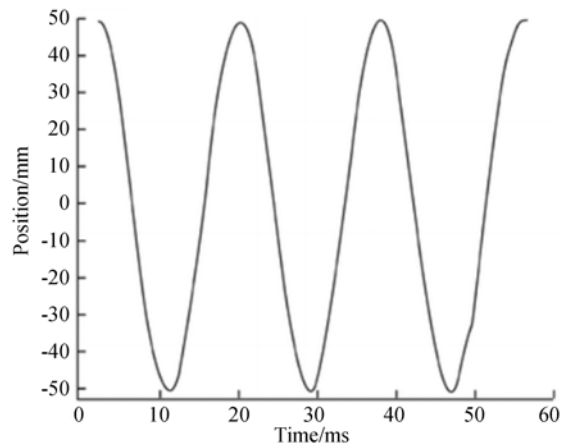


图 9 余弦运动轨迹
Fig. 9 Trajectory of cosine motion

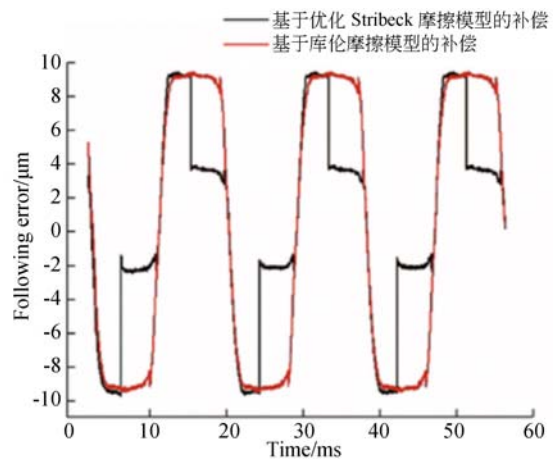


图 10 跟随误差对比曲线
Fig. 10 Comparison of following errors of different algorithms

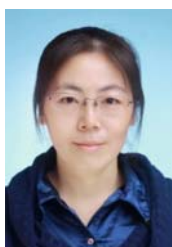
5 结 论

本文对传统的 Stribeck 摩擦模型进行优化,并提出了基于最小二乘法的迭代辨识算法。摩擦模型输入为速度标志函数、实际速度和实际位移,输出摩擦力以偏移量的形式写入系统。控制系统速度环的仿真结果表明,对于摩擦扰动,优化摩擦模型补偿较 DOB 补偿具有更好的补偿效果。实验表明,平台在以较低和较高速度做直线运动时,基于改进 Stribeck 摩擦模型补偿的跟随误差较基于库伦摩擦补偿分别减小了 67.67% 和 51.63%。平台在做余弦运动的非换向时,跟随误差下降了 7 μm ,摩擦补偿器的效果依然显著,有效提高了系统的动态性能。

参考文献:

- [1] AHN H S, CHEN Y Q. State-dependent friction force compensation using periodic adaptive learning control [J]. *Mechatronics*, 2009, 19 (6): 896-904.
- [2] ASTROM K J, CANUDAS-DE-WIT C. Revisiting the LuGre friction model stick-slip motion and rate dependence[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(6): 101-114.
- [3] PENNESTRÌ E, ROSSI V, SALVINI P, *et al.*. Review and comparison of dry friction force models [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 83 (4): 1785-1801.
- [4] 王延忠, 郭超, 贾树王, 等. 基于 Stribeck 摩擦模型的盘式摩擦副稳定性分析[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(21): 2521-2525.
WANG Y ZH, GUO CH, JIA SH W, *et al.*. Stability analysis of disc friction pairs based on Stribeck model [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(21): 2521-2525. (in Chinese)
- [5] CONG S, DENG K, SHANG W, *et al.*. Isolation control for inertially stabilized platform based on nonlinear friction compensation[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 84(3): 1123-1133.
- [6] 陈浩, 孟健, 安琦. 直线电机滑台摩擦特性和摩擦模型[J]. *华东理工大学学报: 自然科学版*, 2017, 43 (4): 571-577.
CHEN H, MENG J, AN Q. Friction characterization and friction model of a linear-motor rolling-guide stage [J]. *Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2017, 43(4): 571-577. (in Chinese)
- [7] KATO H. Characteristic analysis on an extended dahl model for planar two-dimensional motion[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2017, 83(6): 607-612.
- [8] 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)
- [9] 晋超琼, 张葆, 李贤涛, 等. 基于 LuGre 模型的航空光电稳定平台的摩擦力矩补偿[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(30): 103-107.
JIN CH Q, ZHANG B, LI X T, *et al.*. Friction compensation of aerial photoelectrical stabilized platform based on the LuGre model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(30): 103-107. (in Chinese)
- [10] 郭鹏飞, 邓永停, 王帅, 等. 基于摩擦模型的反演滑模控制在大型望远镜上的应用[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2620-2626.
GUO P F, DENG Y T, WANG SH, *et al.*. Back-stepping sliding mode control of large telescope based on friction model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2620-2626. (in Chinese)
- [11] YE H S S, SU H C. Development of friction identification methods for feed drives of CNC machine tools [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 52(1): 263-278.
- [12] 姜振海, 徐思晨, 谷东伟, 等. 基于区间分析理论的摩擦补偿研究[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1519-1525.
JIANG ZH H, XU S CH, GU D W, *et al.*. Research on friction compensation based on interval analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1519-1525. (in Chinese)
- [13] 曾德林, 肖凯, 林竹翀, 等. 航空遥感惯性稳定平台 LuGre 摩擦参数的分步辨识[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1148-1158.
ZENG D L, XIAO K, LIN ZH CH, *et al.*. Sub-step identification of LuGre friction parameters of inertially stabilized platform for airborne remote sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1148-1158. (in Chinese)

作者简介:



马立(1979—),女,黑龙江人,研究员,博士生导师,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为上海大学机电工程与自动化学院教师,主要研究方向为微操作机器人技术。E-mail: malian@shu.edu.cn



王敬萍(1994—),女,上海人,硕士研究生,2016年于上海大学获得学士学位,主要研究方向为精密定位平台的控制与摩擦补偿。E-mail: 1244780834@qq.com