

DOI: 10.7652/xjtuxb201311012

数控机床摩擦误差自适应补偿方法研究

冯斌¹, 梅雪松^{1,2}, 杨军¹, 牟恩旭¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了提高数控机床的加工精度,降低由摩擦造成的轮廓误差,针对传统摩擦误差补偿方法难以达到最优补偿效果的问题,提出了一种针对数控机床进行摩擦误差自适应补偿的方法。该摩擦误差补偿方法通过摩擦补偿参数学习算法对摩擦误差补偿脉冲幅值进行粗、精学习,并采用广义回归神经网络拟合生成具有高精度的摩擦补偿脉冲幅值函数,实现了对摩擦误差自适应补偿。对 X-Y 轴工作台的摩擦误差自适应补偿实验结果表明,不同工况下过象限处的圆轮廓误差峰值及摩擦补偿效果评价价值均降低 55% 以上,与常规矩形摩擦补偿脉冲相比,具有对伺服进给系统冲击小、摩擦补偿特性适应性强和补偿效果好的优点,能够有效地提高机床的加工精度。

关键词: 摩擦误差;误差补偿;伺服进给系统;加工精度

中图分类号: TP271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0065-05

Adaptive Compensation of Friction Error for Numerical Control Machine Tool

FENG Bin¹, MEI Xuesong^{1,2}, YANG Jun¹, MU Enxu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the machining precision of numerical control machine tool and reduce contour error caused by friction, a novel adaptive compensation of friction error strategy is proposed to solve the problem that conventional method for compensation of friction error can hardly achieve desired performance. Via coarse and fine learning process for amplitude of compensation pulse, the amplitude function of friction compensation pulse is established by precision curve fitting based on generalized regression neural network algorithm, and the friction error can be compensated adaptively. The new compensation strategy is adopted on a X-Y worktable, the peak of circular contour error in quadrant and the evaluation function value of friction compensation are reduced by more than 55% under different working conditions. Compared with the conventional rectangular pulse friction compensation, the proposed approach effectively improves the machining precision of the machine tool due to the robust adaptability, lower impact on the servo feed system and better compensation performance.

Keywords: friction error; error compensation; servo feed system; machining precision

为了实现数控机床伺服进给系统高精度运动的控制,需要考虑运动过程中影响精度的主要因素,如

环境温度变化、振动、间隙、摩擦等。环境温度、振动及间隙可通过采取一定的措施进行解决,但摩擦是

收稿日期: 2013-05-13。 作者简介: 冯斌(1980—),男,博士生;梅雪松(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA040701)。

网络出版时间: 2013-09-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130906.1703.009.html>

一种复杂的非线性时变现象,目前还无法找到相关方法来彻底解决摩擦带来的不利影响。摩擦特性与接触面法向承载力、润滑条件、湿度、温度、运动位置等众多因素密切相关^[1],对于数控机床伺服进给系统,摩擦是引起高速、高精度数控机床伺服进给系统轮廓误差的主要因素之一^[2],摩擦不利于运动精度的控制并在低速时表现出很强的非线性特征^[3]。摩擦误差主要出现在数控机床伺服进给系统运动反向时,由于摩擦力发生非线性变化,使传统的线性伺服运动控制器无法进行有效控制,因此造成了误差。为了补偿数控机床伺服进给系统中由摩擦因素带来的误差,通常根据摩擦模型,采用扰动观测器、神经网络控制器、重复控制和摩擦补偿脉冲前馈进行补偿^[4]。摩擦模型及扰动观测器的摩擦误差补偿方法均需要通过对伺服进给系统摩擦特性及控制对象进行精确建模以实现摩擦力的精确预测^[5-6]。神经网络控制器及重复控制器构建的伺服进给系统,对特定的运动控制器及运动轨迹有效,但却限制了上述2种方法的实际应用^[7]。在摩擦误差发生时,摩擦补偿脉冲前馈补偿法将摩擦补偿脉冲加入到数控机床伺服进给系统中,从而实现了误差的抑制^[8]。

本文提出了一种数控机床摩擦误差自适应补偿方法,该方法能够对具有时变特征的摩擦补偿特性参数进行智能在线学习,并自动生成摩擦补偿脉冲幅值函数,依据数控机床所处工况来实现摩擦误差自适应补偿。本文方法通过不同工况下的圆运动轨迹实验,显著抑制了在过象限处的摩擦误差,并可依据摩擦误差补偿初始化来设置参数,从而满足了对不同摩擦误差补偿效果的需求。

1 摩擦误差自适应补偿原理

摩擦误差补偿通过对外部施加摩擦补偿脉冲量使工作台在较短的时间内运动,从而实现了摩擦误差补偿。由于伺服进给系统速度环相对于位置环,其控制周期较短且带宽较高,因此选择摩擦补偿脉冲量添加到速度环指令处(见图1)。通常情况下,数控机床在一定的工况范围内,伺服进给系统的控制参数保持不变,摩擦补偿脉冲的幅值和持续时间的合理取值主要与运动轨迹参数相关。数控机床进行圆运动时,轨迹反向点的加速度值等于该圆的向心加速度值,而圆向心加速度值可通过圆轨迹指令获得,且圆向心加速度包括圆运动轨迹的主要参数^[9]。因此,自适应摩擦误差补偿可通过建立摩擦补偿脉冲相关参数与圆向心加速度之间的函数关系

来实现。

采用线性及非线性曲线形状的摩擦补偿脉冲均可实现摩擦误差补偿,然而非线性曲线形状的摩擦补偿脉冲存在脉冲形状参数较多、确定参数的值比较复杂、使用不方便,以及参数值计算需要耗费较多的时间等问题,因此本文采用梯形摩擦补偿脉冲来进行摩擦误差补偿。与常规矩形摩擦补偿脉冲相比,梯形摩擦补偿脉冲具有对伺服进给系统冲击小、对摩擦补偿适应性强及补偿效果好等优点。如图2所示,梯形摩擦补偿脉冲的形状主要由摩擦补偿脉冲上升时间 t_r 、摩擦补偿脉冲下降时间 t_d 、摩擦补偿脉冲幅值 F_p 及摩擦补偿脉冲时间 F_t 来决定。摩擦补偿脉冲的最大幅值为

$$F_m = t_r a_1 \quad (1)$$

式中: a_1 为伺服进给轴加速度最大允许值。

在高、低速进给速度下,由摩擦产生的误差尖峰持续时间的平均值为 F_t 。在未进行摩擦误差补偿时, t_r 、 t_d 根据摩擦误差的尖峰上升及下降时间进行设定。 F_p 的取值通过摩擦补偿参数学习所生成的与圆向心加速度相关的函数曲线来完成。

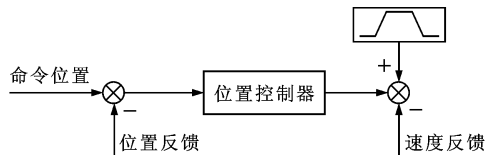


图1 摩擦误差的补偿原理

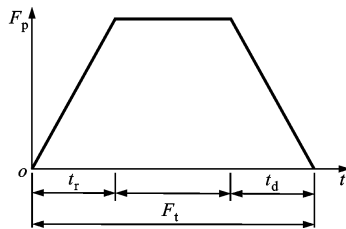


图2 梯形摩擦补偿脉冲

2 摩擦补偿参数的学习算法

通过摩擦补偿脉冲幅值参数的在线学习,生成与圆运动轨迹反向点的加速度,即与圆向心加速度相关的摩擦补偿脉冲幅值数组。在摩擦补偿参数粗、精学习阶段,数控机床按照粗、精学习轨迹进行运动,其轨迹特征均为半径不变、进给速度由轨迹反向点加速度即向心加速度决定的变进给速度圆轨迹。

2.1 摩擦补偿参数粗学习阶段

在摩擦补偿参数粗学习阶段,数控机床按照粗

学习轨迹进行运动,在线学习摩擦补偿脉冲幅值参数,并自动生成粗摩擦补偿脉冲幅值数组。根据实际加工工艺需求及摩擦误差补偿效果要求,通过设置多个不同的圆向心加速度区间及区间步长数,可使在不同的加速度区间段具有不同的摩擦误差补偿精度。为了简化分析,本文设置了 3 个不同的圆向心加速度区间,综合设置的数控机床各伺服进给轴摩擦误差补偿的相关参数为最小加速度 a_i 、最大加速度 a_m 、加速度区间 1 的特征值 a_1 、加速度区间 2 的特征值 a_2 、加速度区间 1 的步长数 N_1 、加速度区间 2 的步长数 N_2 、加速度区间 3 的步长数 N_3 、粗学习运动循环次数 N_c 、精学习运动循环次数 N_F 、摩擦补偿脉冲时间 F_t 、粗学习摩擦补偿脉冲幅值初值 F_i 、粗学习摩擦补偿脉冲幅值增量 F_{cs} 、精学习摩擦补偿脉冲幅值增量 F_{fs} 、 t_r 和 t_d 。设置完成的圆向心加速度区间如图 3 所示。

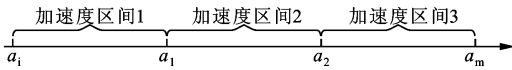


图 3 圆向心加速度区间

粗学习摩擦补偿脉冲幅值的初始值为

$$F_i = \eta F_m \quad (2)$$

式中: η 为摩擦误差补偿系数,根据摩擦误差特性及实验确定,一般取 η 为 0.1~0.15。摩擦补偿参数粗学习阶段开始时,采用受外界干扰较小的指令位置信号进行反向点判别,当判断出各联动轴位置指令处于反向点时,开始进行摩擦误差补偿。在该进给速度下的粗摩擦补偿次数由 N_c 决定。当粗摩擦补偿次数小于粗学习运动循环次数时,摩擦补偿脉冲幅值迭代更新为

$$\left. \begin{aligned} F_p &= F_i \\ F_p &= F_p + F_{cs} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

采用摩擦补偿效果评价,对每次摩擦补偿脉冲幅值迭代更新后的摩擦补偿效果进行评价,其值越小,摩擦补偿效果越好。摩擦补偿效果评价值为

$$\left. \begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^{N_s} |p_c(i) - p_f(i)| / N_s \\ N_s &= T_c / T_s = 2F_t / T_s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: p_f 为数控机床工作台实际位置; p_c 为数控机床指令位置; T_c 为摩擦误差测量时间; N_s 为采样点数; T_s 为采样周期。

在圆向心加速度即反向加速度 a_c 下,不同摩擦补偿脉冲幅值所对应的评价值组成摩擦补偿效果评价数组,从该数组中选取摩擦补偿效果的评价最小

值 E_c 所对应的摩擦补偿脉冲幅值 F_c ,则该摩擦补偿脉冲幅值为在圆向心加速度下的最优摩擦补偿脉冲幅值

$$\left. \begin{aligned} E_c &= \min([E_{c1}, E_{c2}, \dots, E_{cj}, \dots, E_{ci}]) \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N_c \\ F_c &= F_i + (j-1)F_{cs} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

当粗摩擦补偿次数等于粗学习运动循环次数时,将圆向心加速度迭代更新,在圆轨迹半径保持不变的基础上,计算出相应的进给速度值,数控机床按照此进给速度值进行圆运动,从而改变原有的运动位置轨迹。迭代更新后的圆向心加速度为

$$a_w = a_p + \Delta a_c \quad (6)$$

式中: a_p 为更新前的圆向心加速度。

综合考虑数控机床摩擦补偿参数的学习效率及不同的圆向心加速度段对摩擦补偿精度的需求,不同圆向心加速度区间的 Δa_c 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta a_c &= (a_1 - a_i) / N_1, \quad a_p \in [a_i, a_1) \\ \Delta a_c &= (a_2 - a_1) / N_2, \quad a_p \in [a_1, a_2) \\ \Delta a_c &= (a_m - a_2) / N_3, \quad a_p \in [a_2, a_m] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

重复迭代上述过程,可得圆向心加速度数组所对应的最优粗摩擦补偿脉冲幅值数组,当 $a_p > a_m$ 时,摩擦补偿特性粗学习阶段结束。最优粗摩擦补偿脉冲幅值数组为

$$[F_{c1}, F_{c2}, \dots, F_{ck}, \dots, F_{cn}]$$

$$n = 1, 2, \dots, (N_1 + N_2 + N_3 + 2); k \leq n \quad (8)$$

当摩擦补偿参数粗学习阶段结束后,最优粗摩擦补偿脉冲幅值数组所对应的圆向心加速度数组为

$$[a_i, a_{c2}, \dots, a_{ck}, \dots, a_m] \quad (9)$$

2.2 摩擦补偿参数精学习阶段

在摩擦补偿参数精学习阶段,数控机床按照精学习轨迹进行运动,在最优粗摩擦补偿脉冲幅值数组的基础上,在线学习摩擦补偿脉冲幅值参数,并自动生成精摩擦补偿脉冲幅值数组。

在最优粗摩擦补偿脉冲幅值数组及其对应的向心加速度数组的基础上,为了提高摩擦补偿参数的学习效率,节省调试时间,对最优粗摩擦补偿脉冲幅值数组进行了扩充,得到的精学习摩擦补偿脉冲幅值基准值数组($1 \times 2n-1$ 维)为

$$[F_{c1}, F_{c2}, F_{c2}, \dots, F_{cj}, F_{cj}, \dots, F_{cn}, F_{cn}] \quad (10)$$

将精学习摩擦补偿脉冲幅值基准值数组元素下标索引重新编号,并记为

$$\left. \begin{aligned} [F_{cf1}, F_{cf2}, F_{cf3}, \dots, F_{cfj}, F_{cf(j+1)}, \dots, F_{cf(h-1)}, F_{cfh}] \\ h = 2n-1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

在最优粗摩擦补偿脉冲幅值数组所对应的圆向心加

速度数组的基础上,将圆向心加速度数组进一步扩充细分为

$[a_{c1}, a_{f12}, a_{c2}, a_{f23}, a_{c3}, \cdots, a_{f(h-1)h}, a_{ch}]$ (12)

其中

$$a_{f(i)(i+1)} = \begin{cases} \Delta a_f = \Delta a_c / 2 \\ a_{f(i)(i+1)} = a_{c(i)} + \Delta a_f, i = 1, 2, \cdots, h-1 \end{cases}$$
 (13)

将扩充细分后的圆向心加速度数组元素下标索引重新编号,并记为

$[a_{f1}, a_{f2}, \cdots, a_{fh}, \cdots, a_h], h = 2n - 1$ (14)

摩擦补偿参数精学习阶段开始时,当判断出各联动轴位置指令处于反向点时,开始进行摩擦误差补偿。当圆向心加速度即反向点加速度为 a_{fj} 、对应的摩擦补偿脉冲幅值的基准值为 F_{cfj} 时,精学习摩擦补偿脉冲幅值的初始值为

$$\left. \begin{aligned} F_{if} &= F_{cfj} - N_F F_{fs}, \quad j = 1, 2, \cdots, h \\ F_p &= F_{if} \end{aligned} \right\}$$
 (15)

在该进给速度下的精摩擦补偿次数由精学习运动循环次数决定。当精摩擦补偿次数小于精学习运动循环次数时,摩擦补偿脉冲幅值迭代更新为

$F_p = F_p + F_{fs}$ (16)

在此过程中,对每次摩擦补偿脉冲幅值迭代更新后的摩擦补偿效果进行评价。同理,从摩擦补偿效果评价数组中选取使摩擦补偿效果评价最小值所对应的摩擦补偿脉冲幅值,则该摩擦补偿脉冲幅值为在此圆向心加速度下最优的摩擦补偿脉冲幅值。

当该进给速度下的精摩擦补偿次数等于精学习运动循环次数时,对 a_w 进行迭代更新,在圆轨迹半径保持不变的基础上,计算出相应的进给速度值。数控机床按照此进给速度值进行圆运动,从而改变了运动位置轨迹。迭代更新后

$a_w = a_p + \Delta a_f$ (17)

重复迭代上述过程,当 $a_p > a_m$ 时,摩擦补偿参数精学习阶段结束,得到的圆向心加速度数组所对应的最优精摩擦补偿脉冲幅值数组为

$[F_{f1}, F_{f2}, \cdots, F_{fl}, \cdots, F_{fh}], l = 1, 2, 3, \cdots, h$ (18)

3 摩擦误差补偿实验验证

为了验证摩擦误差自适应补偿方法,本文通过搭建的开放式数控实验平台,对 X-Y 轴工作台进行摩擦误差补偿。实验平台由高性能伺服电机、驱动器及开放式数控系统组成,伺服进给轴均采用高分辨率的光栅尺进行全闭环运动控制,加速度最大允

许值 a_1 均为 1 m/s^2 。设置的数控机床各伺服进给轴摩擦误差补偿初始化参数如表 1 所示,由于广义回归神经网络 (GRNN) 算法具有结构简单、参数设置简便、训练所需时间短及全局收敛等优点,因此本文采用 GRNN 算法对最优精学习摩擦补偿脉冲幅值数组进行高精度拟合^[10]。

表 1 摩擦误差补偿的初始参数

初始值	X 轴	Y 轴
N_1	10	10
N_2	8	8
N_3	8	8
N_C	11	11
N_F	3	3
t_r/ms	5	5
t_d/ms	55	55
T_s/ms	1	1
F_t/ms	80	80
$a_i/\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$	0.2	0.2
$a_1/\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$	50	50
$a_2/\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$	100	100
$a_m/\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$	150	150
$F_i/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.6	0.6
$F_{fs}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.1	0.1
$F_{cs}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0.4	0.4

广义回归神经网络算法包括了输入层、模式层、求和层与输出层 4 层神经元,其中输入层中的神经元数等于最优精摩擦补偿脉冲幅值数组的维数,各神经元是简单的分布单元,可直接将输入变量传递给模式层。GRNN 算法中的求和层对神经元求和,其输出层输出最优精学习摩擦补偿脉冲幅值的估计结果。当圆轨迹半径为 50 mm ,X-Y 轴依次按照粗、精学习轨迹进行运动时,其摩擦补偿脉冲幅值函数的拟合曲线及其对应的最优精学习摩擦补偿脉冲幅值数组(见图 4)表明,GRNN 算法能够高精度地拟合 X-Y 轴最优精摩擦补偿脉冲幅值数组。

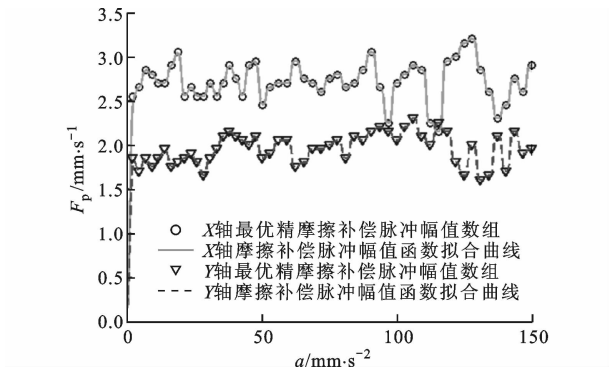


图 4 摩擦补偿脉冲幅值函数、数组的拟合曲线

当圆轨迹半径为 25 mm,进给速度为 0.5、1~3 m/min时,分别进行无摩擦误差补偿及摩擦误差自适应补偿实验,其中 $F=1$ m/min 时,圆轮廓误差在过象限处的补偿效果对比如图 5 所示,可见由摩擦造成的误差尖峰已基本消除,达到了理想的补偿效果。在摩擦误差测量时间内,本文采用过象限处的 X、Y 方向圆轮廓误差峰值 P_{eX} 、 P_{eY} 及摩擦补偿效果评价函数 E_X 、 E_Y ,对不同进给速度下的补偿效果进行综合评价,其评价结果如表 2 所示。由表 2 可见,由摩擦造成的过象限处(0° , 90°)的 P_{eX} 、 P_{eY} 及 E_X 、 E_Y 均明显减小,达到了较为理想的摩擦误差补偿效果。

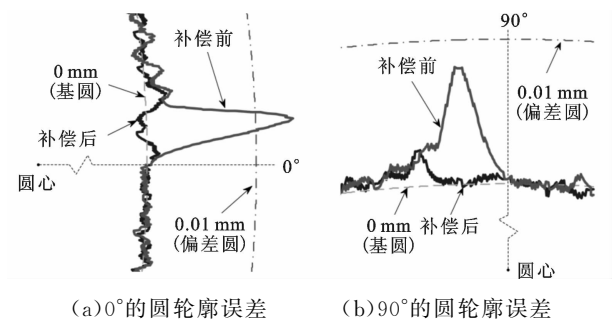


图 5 摩擦误差补偿效果的对比

若商用数控系统具备实现本文提出的摩擦误差自适应补偿方法所需信息的开放性,以及支持算法实现的软件环境,可将该补偿方法以摩擦误差补偿模块的形式嵌入到数控系统中。该补偿模块的具体工作流程如图 6 所示。

表 2 摩擦误差补偿效果综合评价表

$F/\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	未补偿误差/ μm				已补偿误差/ μm			
	P_{eX}	P_{eY}	E_X	E_Y	P_{eX}	P_{eY}	E_X	E_Y
0.5	10.0	6.0	4.7	2.8	2.3	2.2	1.1	1.0
1.0	10.7	8.6	4.9	3.1	2.4	2.5	1.0	0.9
2.0	12.4	11.4	4.2	3.0	6.0	4.3	2.3	1.6
3.0	24.2	15.0	5.1	3.4	11.1	5.1	2.5	1.5

4 结 论

(1)针对传统摩擦误差补偿难以达到最优补偿效果的问题,本文提出了一种摩擦误差自适应补偿方法。该方法通过对伺服进给系统的摩擦补偿参数进行粗、精学习,生成摩擦补偿脉冲幅值函数,实现了对摩擦误差的自适应补偿。该方法具有补偿效果好且自动智能等优点,可大幅度提高数控机床的摩擦补偿调试效率。

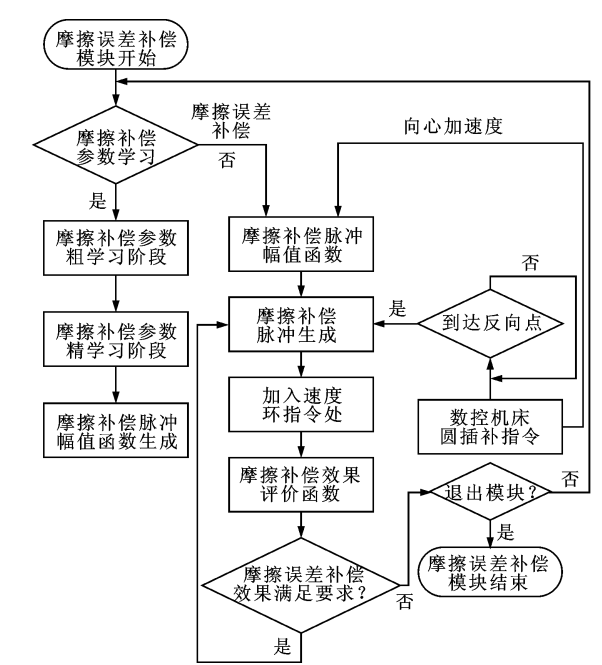


图 6 摩擦误差补偿模块的工作流程

- (2)由于最优精学习补偿脉冲幅值与圆向心加速度的对应关系是一种复杂的非线性关系,难以用近似公式和传统最小二乘法进行拟合,因此本文采用广义回归神经网络算法,实现了对最优精学习摩擦补偿脉冲幅值数组的高精度拟合。
- (3)保持圆轨迹半径不变,在不同进给速度下,采用本文提出的方法对 X-Y 轴工作台进行摩擦误差自适应补偿,依据过象限处的圆轮廓误差峰值、摩擦补偿效果,对摩擦误差自适应补偿效果进行综合评价。实验结果表明,过象限处的圆轮廓误差峰值及摩擦补偿效果评价函数值均降低了 55% 以上,从而验证了本文方法的有效性,表明本文方法能够对不同进给速度下的摩擦误差进行自适应补偿,并且达到了较为理想的摩擦误差补偿效果。

参考文献:

[1] ARMSTRONG-HÉLOUVRY B, DUPONT P, WIT D L. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction [J]. Automatica, 1994, 30(7): 1083-1138.

[2] 陈光胜,梅雪松,陶涛. X-Y 工作台摩擦误差补偿方法的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 69-73.

CHEN Guangsheng, MEI Xuesong, TAO Tao. Compensation of friction error for X-Y table [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 69-73.

(下转第 96 页)