

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.05.011

基于平滑处理和采样补偿的工作台 定位精度误差补偿法

王 荣, 张敏良, 汲德安, 田 园

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201600)

摘 要:精密工作台存在的机械间隙是影响工作台定位精度的重要来源。基于采样双闭环和运动平滑处理对工作台误差进行补偿,这种方法与间隙大小无关,仅在进给的终点位置读取反馈误差并实时修正,给出了对精密工作台进行补偿的具体实例,补偿后定位精度从25.00 μm 提高到1.14 μm 。通过理论分析和实验验证,表明采样双闭环和平滑处理结合的误差补偿方法对提高系统定位精度十分有效。

关 键 词:精密工作台;误差补偿;采样双闭环;平滑处理;定位精度

中图分类号:TP202.2

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)05-0043-04

Error Compensation Method for Precise Table Based on Motion Smoothing and Sampled Dual Loop

WANG Rong, ZHANG Minliang, JI Dean, TIAN Yuan

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract: Mechanical clearance is one of the vital factors which can not be ignored in precise table. To improve the positioning precision, the error curve of a precise table was measured and the system error was compensated based on the sampled dual loop and motion smoothing. The sampled dual loop, reads the load encoder only at the end point and performs a correction. This method is independent of the size of the mechanical clearance. Specific compensation example was given, the positioning precision of the precision table was improved from 25.00 μm to 1.14 μm after compensation. The theoretical analysis and experimental results show that the error compensation method based on the sampled dual loop and motion smoothing is effective to improve the positioning precision for precision table.

Key words: precision table; error compensation; sampled dual loop; motion smoothing; positioning precision

随着微电子技术、通信、航天和生物工程等学科的迅速发展,对精密机械和仪器的精度要求越来越高,要求相应的精密机械和检测设备具有微米甚至是纳米级精度^[1]。其中,定位精度对系统性能有很大影响,例如机械加工中点位、轮廓控制,直接影响产品的加工精度。精密工作台集机械传动装置、伺服驱动装置、运动控制系统于一体,是实现精密定位技术的具体手段^[2]。

近年来,国内外专家学者对超精密工作台的位置控制以及定位技术作了大量研究,实现工作台的大行程、高速化和精密化主要通过宏/微两级驱动^[3-6]。宏

驱动主要采用直线电机驱动或者伺服电机带动滚珠丝杠方式实现大行程和高速度,而微驱动大多通过压电元件、摩擦组件和弹簧膜片等特殊微变形材料实现高精度微进给^[7-8]。

目前提高定位精度主要通过硬件精度和软件补偿来实现^[9]。软件补偿是人为制造出一种新的误差去抵消或补偿原始误差,以提高定位精度,该方法可通过小成本获取高精度,是现代精密工程中重要技术手段之一^[10]。本文基于平滑滤波原理和采样双闭环方法对工作台间隙进行补偿,通过理论分析和实验验证,表明采样双闭环和平滑处理结合的误差补偿方法对提高

收稿日期:2014-02-28;修回日期:2014-03-25

作者简介:王荣(1989),男,安徽当涂人,硕士研究生,主要研究方向为精密/超精密加工。E-mail:wangr1231@sina.com

系统定位精度十分有效。

1 误差补偿原理

如图1所示,本研究实验设备采用20位增量式安川伺服电机通过高精度滚珠丝杠驱动工作台,行程200 mm,用JENA直线光栅作为反馈回路,分辨率为0.5 μm 。该装置采用GALIL DMC2143运动控制卡作为交流伺服系统的上位控制单元,在整个控制系统中起着灵魂作用。

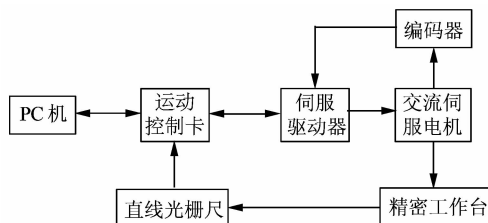


图1 工作台系统构成

Figure 1 Structure of precise table system

精密工作台进给传动链中存在着机械间隙,这一因素导致了背隙误差和螺距累积误差,影响了工作台的定位精度。交流伺服电机接收到运动控制卡所发出指令后发出脉冲,滚珠丝杠按照脉冲指令数进行相应的角位移,文中伺服电机与滚珠丝杠通过刚性联轴器直连,伺服电机与滚珠丝杠转动角度相同,通过丝杠螺母支座滑块将伺服电机的角位移转化为精密工作台的直线运动。其移动量 ΔL_1 可通过以下公式计算得出^[11]

$$\Delta L_1 = \frac{\theta_1}{2\pi} \times P \quad (1)$$

式中: θ_1 为伺服电机的角位移; P 为滚珠丝杠导程。然而直线光栅反馈的直线位移为 ΔL_2 ,出现的误差值 ΔL 即为工作台误差。误差补偿原理如图2所示,文中所研究误差补偿方法通过对工作台传动的终点位置进行采样,及时反馈并通过程序补偿,达到提高定位精度目的。

2 采样补偿分析

通常软件上的误差补偿方法分为2种:连续双闭环和采样双闭环。连续双闭环是把2个反馈信号相结合以达到稳定,这种方法需要实时监测、反馈并补偿,注重工作台进给的整个过程。而采样双闭环只在部件的终点读取光栅反馈的位移值,并进行位置修正。这种方法与间隙大小无关,且编程简单,操作方便,图3为采样双闭环补偿程序图。

本实验工作台出厂定位精度为25 μm ,行程200 mm,考虑能全局把握工作台的定位精度,分别用2种实验来分析采样补偿前后开环控制下误差反馈状况。

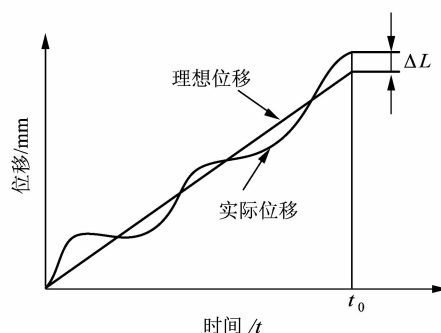


图2 误差补偿原理

Figure 2 Principle of error compensation

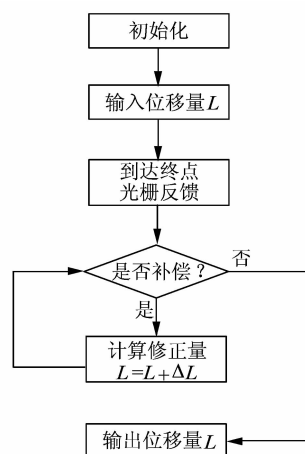


图3 采样补偿程序流程图

Figure 3 Program flow chart of sampling compensation

第1种是对工作台100 mm处定位精度补偿前后重复100次实验,对比实验结果,见图4;第2种是对工作台行程中每隔5 mm共20个采样点进行采样补偿并记录,每个采样点均重复实验了100次,对比实验结果,如图5所示。

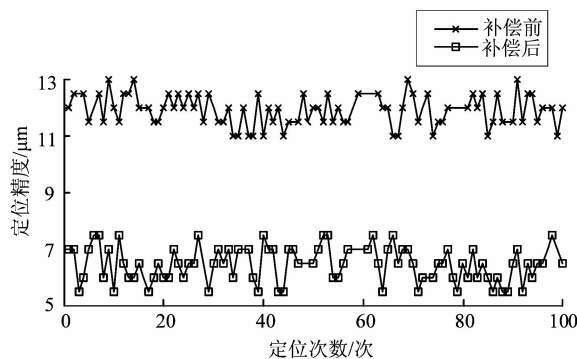


图4 100 mm处定位精度曲线

Figure 4 Curve of 100 mm positioning precision

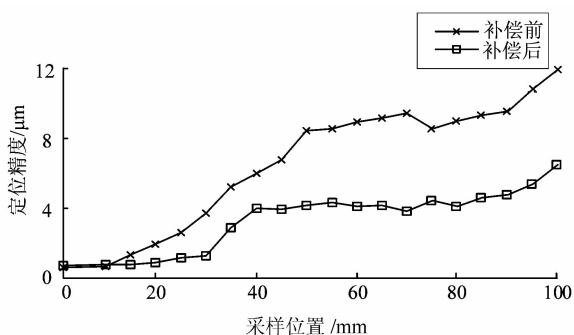


图5 采样点定位精度曲线

Figure 5 Curve of positioning precision at sampling points

分析 100 mm 处定位精度曲线可以得出:在运动控制卡开环的控制模式下,定位精度由机械固有的 $25.00 \mu\text{m}$ 提升到 $11.92 \mu\text{m}$,波动幅度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。而通过采样双闭环的补偿后,定位精度提高到 $6.49 \mu\text{m}$ 。结果表明,通过采样双闭环的误差补偿方法对工作台定位精度的提高是有效的。但是,从采样点定位精度曲线中发现,在工作台进给过程中,定位精度会随着位移增加而线性降低,表明系统中依旧存在着累积误差和机械冲击,误差来源于螺距累积误差,说明采样双闭环的补偿方法对于整个工作台的行程定位精度提高有一定效果,但对累积误差和机械冲击的补偿效果并不明显。

3 运动平滑处理

常见的运动平滑处理方法有梯形加减速方法和 S 形加减速方法。梯形加减速应用普遍、算法简单,使加速度突然从零变到设定的最大值,不连续的加速度往往会引起振荡,不能保证系统的柔性,影响系统精度。S 形加减速曲线加速阶段速度推导如下^[12]:

1) 加加速

$$f(t) = f_1 + \frac{1}{2} J t^2 \quad 0 \leq t \leq T_1 \quad (2)$$

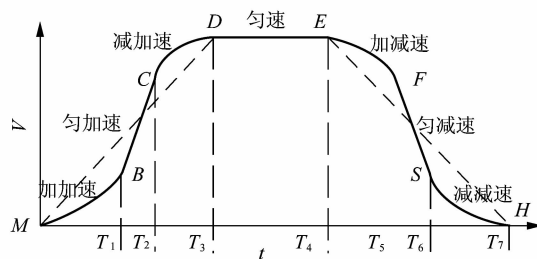
2) 匀加速

$$f(t) = f_1 + \frac{1}{2} J T_1^2 + J T_1 t \quad 0 \leq t \leq T_2 \quad (3)$$

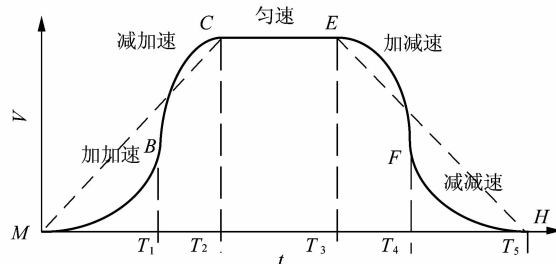
3) 减加速

$$f(t) = f_1 + \frac{1}{2} J T_1^2 + J T_1 T_2 + J T_1 t - \frac{1}{2} J t^2 \quad 0 \leq t \leq T_3 \quad (4)$$

本文基于胡文莉等人改进的五段 S 形加减速方法^[13],如图 6 所示,该方法将传统 7 阶段 S 加减速曲线^[14]简化为 5 阶段来计算,即加加速、减加速、匀速、加减速和减减速 5 阶段。



(a) 传统7阶段S加减速曲线



(b) 5阶段S加减速曲线

图6 S加减速曲线运动描述

Figure 6 Motion description of S shape curve acc/dec

平滑处理后的定位精度对比如图 7 和图 8 所示,通过运动平滑处理,工作台定位精度提高到 $1.14 \mu\text{m}$,并且随着工作台传动位移的增加,定位精度一直保持在平稳的范围内,很好地解决了螺距累积误差影响和振动的冲击。

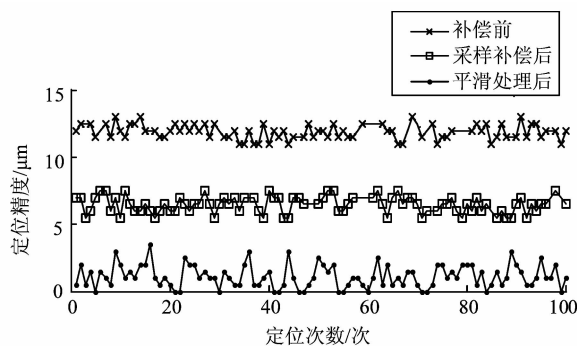


图7 100 mm处平滑处理前后定位精度曲线

Figure 7 Curve of 100 mm positioning precision after motion smoothing

4 结论

本文基于采样双闭环的补偿方法和运动平滑处理,把精密工作台的定位精度由 $25.00 \mu\text{m}$ 提高到 $1.14 \mu\text{m}$,很好地补偿了机械间隙造成的螺距累积误差和系统的振动冲击。实验结果表明,这种补偿方法算法简单,补偿效果十分明显,补偿后的精度稳定,成本低,给工程应用提供了一种有效地提高定位精度的

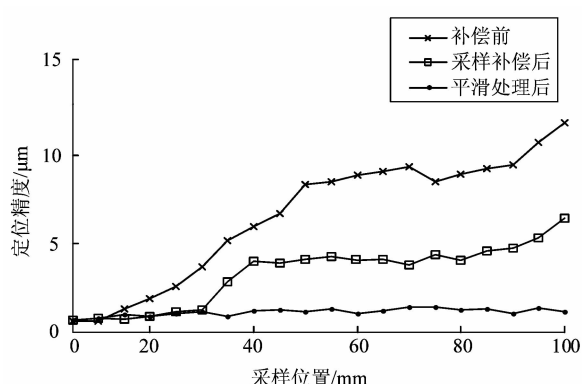


图8 采样点平滑处理前后定位精度曲线

Figure 8 Curve of positioning precision at sampling points after motion smoothing

方法,可以在现有条件下应用软件补偿方法来满足机械系统对精度的高要求。

参考文献:

- [1] 王兴松.精密机械运动控制系统[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] YONEZAWA H, HIRATA Y, SASAI H, et al. Positioning table with high accuracy and high speed [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1990, 39(1): 433-436.
- [3] 张金龙, 刘阳, 郭怡倩, 等. 纳米级超精密定位工作台的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 187-192.
- [4] 程维明, 孙麟治, 章海涛. 利用补偿提高精密定位平台的定位精度[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 884-888.

- [5] 腾伟, 柳亦兵, 穆海华. 光刻机工作台超精密运动与同步控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 185-190.
- [6] SHINNO H, YOSHIOKA H, SAWANO H. A newly developed long range positioning table system with a sub-nanometer resolution [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 403-406.
- [7] KANG Dongwoo, KIM Kihyun, KIM Dongmin, et al. Optimal design of high precision XY-scanner with nanometer-level resolution and millimeter-level working range [J]. Mechatronics, 2009, 19(4): 562-570.
- [8] SHIMIZU Yuki, PENG Yuxin, KANEKO Junji, et al. Design and construction of the motion mechanism of an XY micro-stage for precision positioning [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 395-406.
- [9] 王宏涛, 赵转萍, 赵雪东, 等. 滚珠丝杠螺距误差补偿法提高数控机床定位精度的研究[J]. 航空精密制造技术, 2001, 37(5): 2-4.
- [10] 孙立宁, 晏祖根. 基于实时误差补偿的精密定位系统的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(1): 16-18.
- [11] 刘治华, 刘云清, 隋振. 金属平面塑性滚压实验设备及控制系统研究[J]. 机械设计与制造, 2006(3): 42-44.
- [12] CAO W G, CHENG Q X. A kind of arithmetic having the function of "look ahead" in smoothly controlling [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(9): 56-59.
- [13] 胡文莉, 周亚军. 运动平滑处理技术在伺服控制系统中的应用[J]. 机电工程, 2009, 26(10): 48-51.
- [14] 张得礼, 周来水. 数控加工运动的平滑处理[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 125-130.

(上接第42页)

4 结论

1) 背吃刀量 a_p 对 MC6025-MP 型刀片的切削力影响最大, 对 US735-MS 影响最小, 并且对三向力中的主切削力 F_z 的影响最大, 对径向力 F_x 的影响最小。

2) 进给量 f 增大, 三向力也相应增大, 但并不成正比关系, 这对于不同槽型刀片都是成立的。

3) 切削速度 v 的指数均为负数, 且数值都小于 1, 可以认为切削速度 v 对切削力的影响很小。

4) 不同槽型刀片在相同切削条件下对切削力的影响因槽型的不同而不同, 在本实验中, MC6025-MP 的三向切削力最大, US735-MS 最小。

5) 本实验范围内新型刀片 MC6025-MP 的最适切削用量为: $a_p = 0.05 \text{ mm}$, $f = 0.1 \text{ mm/r}$, $v = 56.9 \text{ m/min}$ 。

参考文献:

- [1] 刘杰华, 任昭蓉. 金属切削与刀具实用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 2-3.
- [2] 王大力, 郑敏利. 复杂槽型切削约束与卷曲半径的预报[J]. 哈尔

- 滨理工大学学报, 2005, 10(1): 20-24.
- [3] 安. Carb_O_Lock 带断屑槽圆刀片及其刀杆[J]. 国外精密工具, 1964, 70(8): 156.
- [4] 陈维福. 带圆弧形断屑槽的可转位刀片[J]. 工具技术, 1987(8): 23-24.
- [5] 杨治国, 曾宪唐, 毛华仪, 等. 精车半精车时新型三维断屑槽型的研究[J]. 机械, 1992, 19(2): 9-13.
- [6] 谷艳丰. 刀具断屑槽参数对断屑影响的分析[J]. 机械工程师, 2011(9): 34-36.
- [7] 冯鸣. 硬质合金可转位刀片断屑槽设计及破损机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 1-2.
- [8] 李玉标, 张弘. 基于正交试验的 PCBN 刀具断续切削力研究[J]. 工具技术, 2011, 45(9): 31-34.
- [9] 袁哲俊. 金属切削实验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 197-218.
- [10] GURBUZ H, KURT A, CIFTCI I, et al. The influence of chip breaker geometry on tool stresses in turning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 57(2): 91-99.
- [11] SHIN Y C, BETTS C A. Control of chips in the turning of 4150 by using an obstruction type chip breaker [J]. Journal of Engineering for Industry, 1993, 115(1): 160-163.