

文章编号 1004-924X(2001)04-0360-04

滚珠丝杠传动机构的微动特性及轨迹跟踪控制

郑子文, 李圣怡

(国防科技大学机电控制及自动化学院机电工程研究所, 湖南长沙 410073)

摘要:滚珠丝杠传动的机床进给机构在微观运动条件下的各种非线性因素和进给系统较高的机械增益是影响机床运动的控制精度进一步提高的主要因素。本文研究了滚珠丝杠进给机构的微动特性, 结果表明库仑摩擦和微弹性现象是滚珠丝杠在微动条件下的主要运动特性。针对这一特性, 提出了一种基于误差的增益自适应控制器, 该控制器能够有效地提高系统的稳定性, 并能保证足够的控制精度。对幅值为 $1\mu\text{m}$ 的正弦输入, 其跟踪控制误差小于 $0.04\mu\text{m}$ 。对幅值为 1mm 的正弦输入, 其跟踪控制误差为 $0.5\mu\text{m}$ 。

关键词:超精加工; 滚珠丝杠传动; 轨迹跟踪; 自适应控制器

中图分类号:TP215 **文献标识码:**A

1 引言

在超精密加工中, 由于被加工零件的轮廓是由机床各坐标轴的联动造成的, 所以机床进给系统的精度扮演着十分重要的角色, 尤其是在非球面的车、铣、磨、抛光等加工中。这要求机床的进给系统具有较大的行程(数百毫米)、亚微米甚至纳米级的分辨率, 轨迹跟踪误差在亚微米以下(这对非球面的超精密加工而言是必须的)。这样的运动精度已接近了机械运动精度的极限, 在这种情况下, 进给系统中的一些非线性因素如死区、变形、摩擦等微观运动特性的影响将表现得非常明显, 制约了进给机构运动精度的进一步提高。

虽然采用适当的丝杠预紧的方法可以减小乃至消除静态反向间隙, 提高传动系统的微观传动刚度, 提高滚珠丝杠传动系统的运动精度, 但不能消除由于库仑摩擦力等非线性不确定因素的影响, 而这些因素直接影响机构的微动特性(微观运动特性)。采用适当的控制策略是进一步提高机床进给运动精度的有效手段。

滚珠丝杠传动机构的超精密控制相对于普通精度控制, 主要区别在于提高了其位置检测精度。位置检测(反馈)精度的提高从三个方面影响控制系统的性能: 一, 增大了机械传动环节增益, 相对减小了系统的稳定性, 对机构运动的精密控制不

利。二, 对于数字控制器而言, 由于受到字长的限制, 反馈精度的提高容易使控制器达到饱和, 限制其调节作用的发挥。三, 反馈精度的提高使传动环节中的非线性因素影响变得明显。因此超精密工作台运动控制器的设计必须考虑这些问题。

2 滚珠丝杠传动的进给机构组成

进给机构示意图见图1, 该机构由DC伺服电机驱动, 采用经过预紧的滚珠丝杠传动, 驱动由气浮导轨支撑的工作台运动。电机轴通过联轴节与丝杠连接, 丝杠由轴承支撑在基座上, 并由A处的一对角接触球轴承轴向固定。丝杠螺母与工作台之间采用浮动单元连接, 以消除丝杠弯曲导致的对工作台运动直线度的影响。工作台的位置由具有 5nm 分辨率的高精度光栅尺检测。该装置中电机和丝杠之间采用周向刚性的联轴节连接, 可以认为电机和丝杠之间无传动误差, 工作台与导轨之间的摩擦可以忽略。

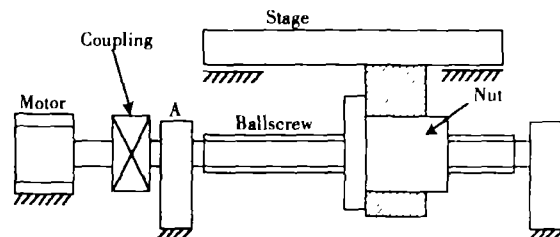


Fig. 1 Diagram of a ballscrew driving stage

收稿日期: 2001-05-08; 修订日期: 2001-05-14

基金项目: “九五”国防预研项目

3 滚珠丝杠驱动的进给系统的微动特性

工作台必须时刻调整位置,以使跟踪误差达到最小。那么滚珠丝杠的微观运动特性便成为提高跟踪控制精度的主要因素。为了观测该进给系统的微动特性,对该系统施加了一系列的位置阶跃信号,阶跃幅值分别为:0.1 μm ,0.2 μm ,0.5 μm ,1 μm ,2 μm 。图2是选取各个典型的阶跃响应并归一化后的响应曲线,可以看出,当阶跃输入的幅值由小变大时,系统响应的上升时间和超调量均具有减小的趋势,这说明进给系统的刚度和阻尼在微动条件下是变化的。

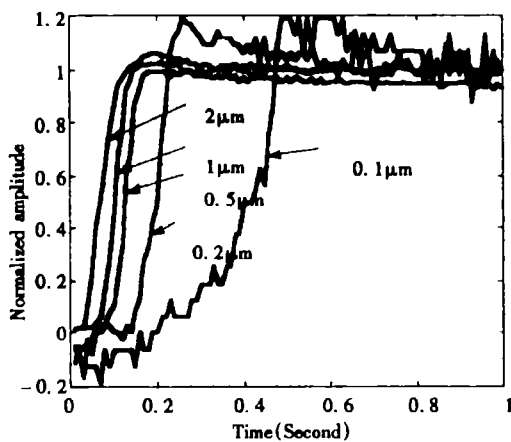


Fig.2 Step responses of the stage under different input amplitudes

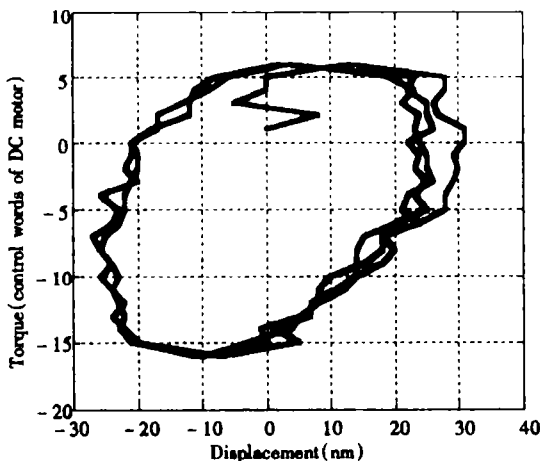


Fig.3 Measured displacement of the ballscrew mechanism dependent on input torque

进一步测试了滚珠丝杠进给机构的输入力矩与输出位移之间的关系,采用力矩电机施加输入

力矩,逐步增大力矩电机的控制字(输出力矩和电机的控制字成线性关系),直到进给机构产生明显运动,然后逐步减小力矩到机构产生明显的反向运动,在这过程中记录工作台的位移,所得到的力矩与位移的关系见图3。该实验说明滚珠丝杠进给机构在微动条件下,其输入力矩与位移之间呈非线性关系,而库仑摩擦和微弹性变形是导致这种非线性现象的主要原因(可以通过一弹簧-质量系统在存在摩擦的条件下的运动来解释这一现象)。

4 控制器的设计

采用PID+速度前馈控制器对图1所示的进给机构进行控制,结果发现当在小行程范围内(微米级)运动时,控制效果良好,但当作大行程运动,进给系统变得不稳定。这是由于进给机构的增益过大所致。由于丝杠的微动特性和宏观运动特性不同,而且在微动条件下机构的特性参数是变化的,而且具有一定的不确定性,所以控制器的设计应当采用变结构控制器。根据前面的分析以及PID控制实验,考虑根据工作台的运动误差调节控制器的增益,运动的位置误差小时采用比较大的增益,以弥补进给机构的微观刚性的不足,提高系统的跟踪精度。运动误差大时采用较小的控制增益,提高系统的稳定性。据此提出了一种被称为基于误差的增益自调节控制器(GSTBE),控制器的结构如图4所示。为了减小进给系统的速度滞后,在控制器中还增加了一个简单的速度前馈。

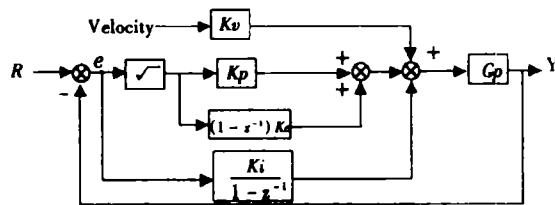


Fig.4 Diagram of GSTBE controller

该方法仍采用PID控制器的结构,只是将位置误差 e 开方后送入比例和积分环节。因为 $\sqrt{e} = e/\sqrt{|e|} = e \times \beta_e$, 所以该算法相当于对普通PID调节器的比例增益 K_p 和积分增益 K_i 分别乘以与误差相关的增益调节因子 $\beta_e = 1/\sqrt{|e|}$ 。

该调节因子能随着误差的变化动态地调整控制器的增益,当误差增大时,减小控制器的增益,能够避免数字控制器发生饱和现象,并增大控制系统的稳定性,当位置误差小时控制器增益变大,减小进给机构在微动条件下的库仑摩擦和微弹性特性对系统的刚度和运动精度的影响。可见该控制器能够很好地满足被控对象的特性要求。在实际应用中表明,该控制器能够使进给机构在较大的速度范围内稳定运动,并且具有足够的控制精度。

5 跟踪控制实验

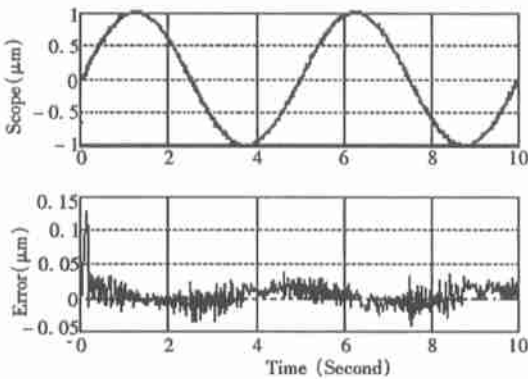


Fig.5(a) Tracking control

采用平方根算子法加速度前馈控制器对该工作台进行控制。图 5(a)是采用该控制器跟踪幅值为 $1\mu\text{m}$ 正弦输入时的结果,跟踪误差仅为 0.04

μm 。图 5(b)是对幅值为 1mm ,周期为 40s 的正弦输入的跟踪控制结果,其跟踪误差 $< 0.5\mu\text{m}$ (该结果为去掉控制输出的相位滞后之后得出的)。从该结果可以看出,当工作台在大的范围内运动时,由于速度较大,伺服进给系统有较大的高频振荡(频率约在 20Hz 左右),进给机构的非线性微动特性可能是造成该现象的主要原因。如何有效抑制工作台在以较大速度运动时的高频速度波动是下一步伺服控制器设计的重点。

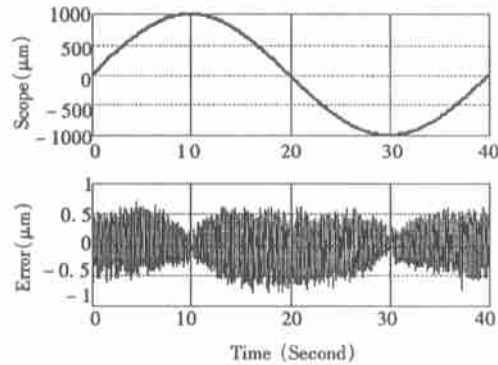


Fig.5(b) Tracking control

6 结 论

对采用滚珠丝杠传动的进给机构进行超精密轨迹跟踪控制时,进给机构的微动特性是制约进给机构的跟踪控制精度进一步提高的主要因素之一。采用 GSTBE 控制器能够较好实现工作台的精密跟踪控制。

参考文献:

- [1] Fukada Shigeo. Ultra-precision positioning with nano-metric resolution using lead-screw mechanism [A]. 1' st International Conference and General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nano-technology [C]. Germany: 1999.
- [2] Chen J S, Dwang I C. A ballscrew drive mechanism with piezo-electric nut for preload and motion control [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 513 - 526.
- [3] Park Chun Hong, Lee Eung Sook, Lee Husang. A review on research in ultra precision engineering at KIMM [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39: 1793 - 1805.
- [4] 朱建中, 李宁, 李圣怡. 同心圆光栅二自由度误差测量系统 [J]. 光学 精密工程, 2000, 8(1): 91 - 95.
- [5] 苏绍景, 吕海宝, 李圣怡. 基于 DSP 的宽动态范围莫尔第纹计数与精密细分技术 [J]. 光学 精密工程, 2001, 9(2): 146 - 150.

Ultra - precision positioning and tracking using ballscrew

ZHENG Zi-wen, LI Sheng-yi

(Institute of Mechatronics Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Ultra-precision machining requires high motion resolution. The nonlinear factors and stability are two major factors to be faced in designing ultra - precision controllers. The design of the machine motion controller is very important in ultra-precision machining. A ballscrew driving stage with resolution of 5 nm and the micro movement characteristics of this mechanism have been researched, respectively. The mechanism is a nonlinear system in micro movement condition. A controller named gain self-tuning controller based on motion error (GSTCBE) is also proposed, which has been proved to be more stable than traditional PID controller. The controller is characterized by higher tracking accuracy in micro and macro motion scope.

Key words: ultra-precision machining; ballscrew driving; tracking control; adaptive controllers

作者简介: 郑子文(1973 -),男,陕西千阳人,1991年进入国防科技大学学习,现在该校攻读博士学位。主要从事超精密加工及控制技术研究。

征订启示

愿《液晶与显示》成为您的良师益友
欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登产品信息

《液晶与显示》是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会及石家庄实力克液晶材料有限公司联合主办的专业性学术期刊。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示领域中最新理论研究、科研成果和创新能力,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态。《液晶与显示》被英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PK)和《中国物理文摘》等国内外著名检索刊物和文献数据库摘引和收录。《液晶与显示》已入编“中国科学核心期刊全文数据库”、“中国学术期刊(光盘版)”和“中国期刊网”(《液晶与显示》网址:<http://yjys.Chinajournal.net.cn>),及“万方数据资源系统(ChinaInfo)”(《液晶与显示》网址:<http://www.Chinainfo.gov.cn/periodical/yjyxs/index.htm>),向国内外读者提供网络信息。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色,内容丰富,信息量大,涵盖面广,可读性强。既是启迪科技人员开拓创新思路的参考期刊,又是从事液晶和显示技术研究的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的良好园地,也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿,将您的科技创新、产品信息、企业风貌通过这一窗口展示出来。

《液晶与显示》为季刊,16开本,80页,国内定价34.00元,国内外公开发售。邮发代号,国内:12-203;国外:4868Q。同时,《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务,随时办理破年、破季订阅。

单 位: 中科院长春光学精密机械与物理研究所

《液晶与显示》编辑部

邮 编: 130021

地 址: 吉林省长春市工农大路61号

电 话: (0431)5684692 转 2534

E-mail: yjys@ciomp.ac.cn