

## 快轴伺服系统的设计与性能测试\*

田富竟<sup>1,2</sup>, 李圣怡<sup>1,2</sup>, 尹自强<sup>1,2</sup>, 李 宁<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;

2. 超精密加工技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**研制了用于加工非回转对称光学元件的快轴伺服系统(FAS)的整体结构及其控制系统,系统具备较大行程和高工作频率,最大的行程可达到30mm。系统采用了音圈电机驱动的气体静压轴承技术、线性电流放大器、高分辨率编码器以及高速控制系统。对不同截面形状气浮导轨的静、动态特性进行了有限元分析。系统采用PID反馈和速度/加速度前馈控制方法来改善系统的动态性能。FAS系统0.1mm阶跃响应的上升时间为2ms,最大超调量为0.4%,稳态时间为4ms,对铝件进行超精密切削实验,表面粗糙度可达Ra24nm,实验结果表明系统具有较好的动态和切削特性。

**关键词:**快轴伺服系统;气浮导轨;音圈电机;PID和前馈控制器

**中图分类号:**TP394.1;TH691.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)04-0152-06

## Design and performance testing of fast axis servo for diamond turning

TIAN Fujing, LI Shengyi, YIN Ziqiang, LI Ning

(College of Mechantronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:**The configuration and control system of a linear long stroke and high frequency fast axis servo (FAS) is developed for the production of asymmetric optics. The maximum stroke of the FAS is 30mm. The proposed Fast Axis Servo (FAS) utilizes the aerostatic bearings driven by a voice coil actuator, a custom linear current amplifier, a high-resolution encoder and a high-speed control system. The static and dynamic characteristic of air slide with different cross-sectional shapes was studied by the finite element method. A control strategy consists of a proportional, integral and derivative (PID) feedback controller and velocity/acceleration feed forward controller was implemented to accommodate the changed system dynamics. The 0.1mm step response was applied on the FAS, the rise time is 2ms, the over shoot is 0.4%, the settling time is 4ms. An aluminum part with the super precision cutting has a surface finish value 24nm Ra. The experiment results indicate that the FAS displays satisfactory dynamic and cutting performance.

**Key words:** fast axis servo; air slide; voice coil actuator; PID and feedforward controller

随着光学技术的发展,非回转对称光学表面的应用日益增多,因为其具有体积小、质量轻等优点,并且能有效简化光学系统的组装。随着超精密加工技术的发展,利用单晶金刚石精密车削方法可以重复加工各种复杂面形的光学零件,可获得较好的形状精度和表面粗糙度,具有更高的效率、更低的成本。超精密快刀伺服技术(FTS)就是在车床上添加压电快刀伺服装置作为辅助轴,其响应很快,但是行程往往低于1mm,可用于加工此类光学元件。被加工表面的面形精度和表面质量在很大程度上依赖于FTS的运动轨迹跟踪精度,应尽可能地减小切削刀具在外部扰动下所产生的跟踪误差,使系统具有高的鲁棒性和跟踪

精度<sup>[1]</sup>。超精密慢刀伺服技术采用直线电机驱动Z轴溜板作往复运动,通过三轴联动来加具有非回转对称特征的工件。现有的慢刀伺服加工工艺由于Z轴溜板的驱动质量较大,导致系统的动态特性较差<sup>[2]</sup>。另外有大量属于非回转对称表面的离轴非球面,其表面高低差在几个毫米,甚至达到数十个毫米,采用快刀伺服技术难以满足加工行程要求,而慢刀伺服加工方法的加工效率较低,并且容易受到环境因素(温度等)的影响,因此有必要研制一种兼顾频响和行程的刀具伺服机构以实现高精度、高效率的非回转对称表面加工,降低此类光学工件的加工成本,提高加工精度与表面质量,长行程高频响的刀具伺服装置则应

\* 收稿日期:2013-10-11

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51075393)

作者简介:田富竟(1987—),男,湖南张家界人,博士研究生,E-mail:18674440178@163.com;

李圣怡(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:13787063892@163.com

运而生。

美国橡树岭国家实验室的 Douglas 于 1983 年首次提出将直线电机和气体轴承用于刀具伺服机构<sup>[3]</sup>,将其应用于离轴抛物镜面的在轴加工。德国的 Satisloh 公司开发了系列商用金刚石车削专用机床,用于眼镜片的加工,这些机床采用音圈电机驱动以及多孔质气体静压轴承的刀具伺服技术,其行程可达 20mm<sup>[4]</sup>。北卡罗来纳大学研发了 FLORA (Fast Long Range Actuator) 技术<sup>[5]</sup>,在 4mm 的工作行程上得到 20Hz 的频响,其研制的第二代实验装置采用多孔质石墨气体静压轴承的形式,进一步减小了封装尺寸和重量以提高其性能。Sebastian Scheiding 等采用美国 Moore Nanotechnology System 公司的 NFTS - 6000 快刀伺服装置(音圈电机驱动气体静压轴承)实现了在较陡的曲面基底上微透镜阵列的加工<sup>[6]</sup>。目前,在国内尚无关于音圈电机驱动气体轴承的快刀伺服装置的相关研究报道。本文的目标就是开发一种新的 FTS(基于音圈电机驱动气体静压轴承),在保证表面质量和加工效率的前提下,其具备更高的行程和分辨率,我们将这种刀具伺服技术称为快轴伺服(Fast Axis Servo)<sup>[7]</sup>,相对于传统的快刀伺服技术来说,其具有更大的运动行程,并且采用气浮轴承驱动。

本文介绍的 FAS 系统结合气体静压轴承设计、音圈电机、高分辨率编码器以及控制算法的新发展,用来提高刀具运动的速度和范围。所设计的 FAS 系统期望达到的目标是在刀具运动幅值为  $\pm 2\text{mm}$  时,其运动频率可达 50Hz,在主轴转速为 1500r/min 时,可加工渐进多焦点镜片(Progressive Additional Lenses)。

## 1 FAS 系统设计

目前,用于驱动 FTS 系统的动力元件主要有压电陶瓷和音圈电机,其中压电陶瓷具有分辨率高、响应速度快的突出特点,以它为驱动元件的 FTS 系统响应频率可以达到上千赫兹,但其需要的驱动电压非常高,行程只有几十微米<sup>[8]</sup>。为了提高系统工作行程(可以达到几十毫米),而且考虑到 FTS 的快速响应等特点,驱动元件选择直线式音圈电机,与压电驱动器相比系统没有固有的迟滞和爬行现象(不但会降低系统的控制精度,而且可能造成系统失稳)<sup>[9-10]</sup>,同时系统采用音圈电机直接驱动,无须传动机构,没有机械摩擦,具备很高的可靠性。因此具有结构简单、体积小、高速、高加速、响应快等特性。然而,音圈电机没

有提供固有的系统静态刚度,在切削过程中为了保证足够的刚度,控制器设计变得尤为重要。系统选用音圈电机作为驱动元件,驱动系统的加速度最大可达 94g,最大行程超过 30mm。快轴伺服系统总体结构图如图 1 所示,安装金刚石刀具的气浮导轨在音圈电机的驱动以及气体静压轴承的支撑下实现往复运动。

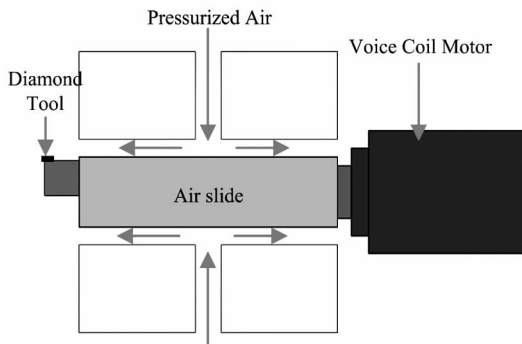


图 1 FAS 系统总体结构布局图

Fig. 1 The structure layout of FAS

### 1.1 气浮导轨结构设计与分析

#### 1.1.1 气浮导轨结构设计

快轴伺服系统需要良好的运动特性,气体静压轴承中气浮导轨的设计是系统的关键。传统的气浮导轨,主要从导向方面设计入手,没有考虑其前端面受力变形等因素,结构复杂,质量较大,动态特性差,运动精度低<sup>[11]</sup>。鉴于此,本文从气浮导轨基本形状入手,分析气浮导轨截面给气浮导轨带来的影响。气浮导轨截面的设计,要注意截面形状简单,力学特性好,并且质量小,最初设计了四种截面形状(三角形、T形、方形以及梯形)的气浮导轨如图 2 所示。

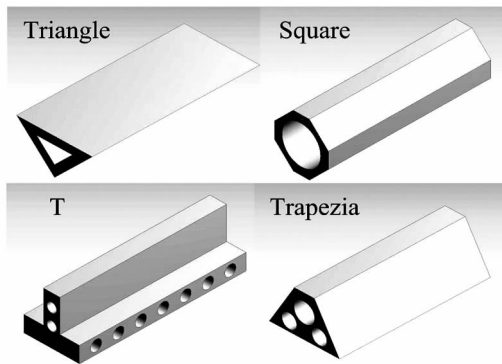


图 2 四种截面形状气浮导轨 CAD 模型示意图

Fig. 2 The CAD model of the four cross-sectional air slide

考虑到气浮导轨驱动质量以及精加工的加工难度,材料选定为铝,因为铝件质量较轻并且可以实现超精密车削加工。通过关于气浮导轨静、动态特性的有限元仿真结果(如图 3 和图 4 所示)

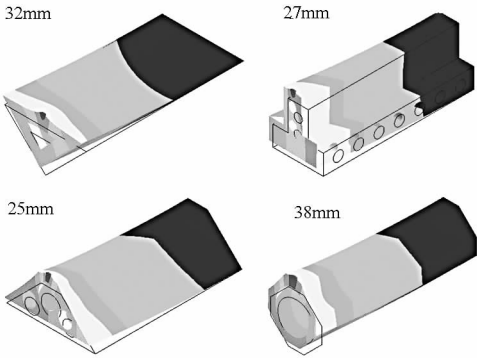


图 3 四种截面形状气浮导轨末端受载仿真变形结果

Fig. 3 Average deformation results of air slide end load on the four cross sections

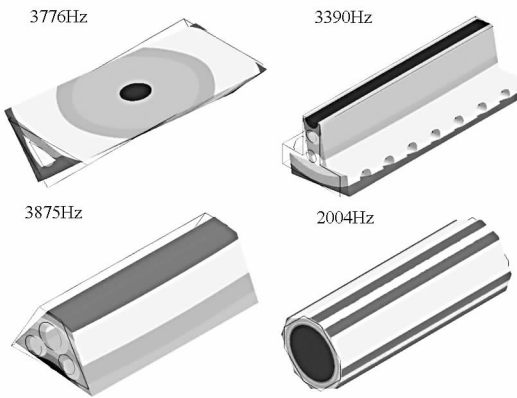


图 4 四种截面形状气浮导轨一阶模态振型图

Fig. 4 The first order mode shapes of the four cross-sectional air slide

可以看出,梯形截面气浮导轨的变形量较小,一阶模态频率较高。考虑到组装性能(光栅尺的精确安装以及轴承的安装面数等),梯形截面气浮导轨的轴承的安装面数只有 3 个(最少),因此系统初步选定梯形截面气浮导轨。

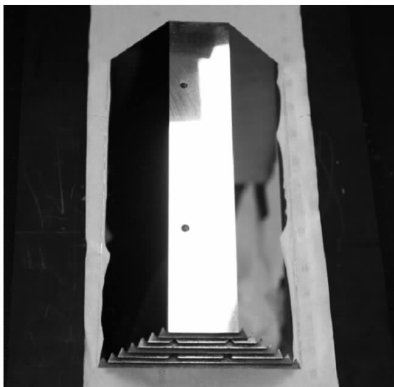


图 5 精加工气浮导轨

Fig. 5 Air slide with finial cut

经过精加工的气浮导轨以及经过完整装配的系统实物分别如图 5 和图 6 所示,系统包括驱动部分、电机冷却循环回路、电机限位和系统隔振

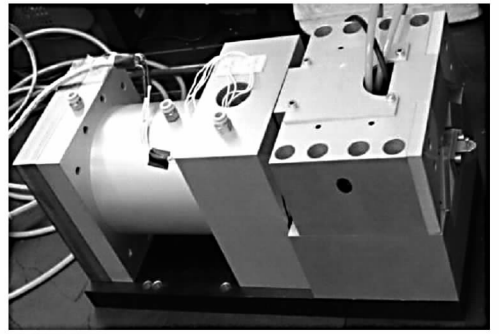


图 6 FAS 系统实物图

Fig. 6 Photography of the FAS

等,采用专门的气体静压轴承精确安装方法对系统进行组装,安装间隙可保证在  $10\mu\text{m}$  左右。

### 1.1.2 气浮导轨性能仿真分析

系统气浮导轨的结构确定以后,我们利用 ANSYS 软件对实际加工而成的气浮导轨的静态特性进行有限元分析,为尺寸参数的确定和优化提供支持。

仿真计算得到气体在多孔质气体静压轴承表面中的压力分布图,如图 7 所示。气体在轴承表面压力分布非常均匀,中心区域很大范围之内压力保持稳定,有利于气浮导轨的均匀支撑。通气压力为  $0.4\text{MPa}$  时,通过有限元仿真得到的气浮导轨末端刚度约为  $35\text{N}/\mu\text{m}$  (竖直方向上加载),如图 8 所示。实验测得的气浮导轨末端刚度为  $30\text{N}/\mu\text{m}$ ,与有限元仿真的结果颇为接近,测量示意图如图 9 所示。



图 7 多孔质气体静压轴承表面压力分布图

Fig. 7 The pressure distribution of the porous air bearing

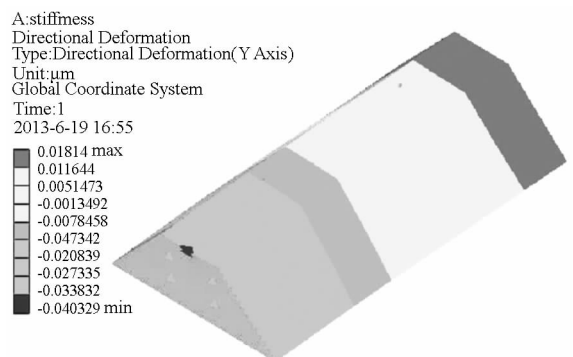


图 8 系统静态刚度仿真结果

Fig. 8 The simulated static stiffness results of FAS

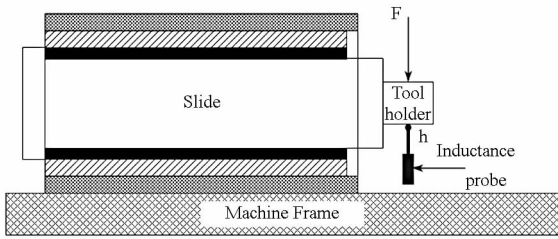


图 9 静态刚度测量示意图

Fig. 9 The schematic diagram of static stiffness testing

模态分析是验证机械系统动态特性的一种有效方法,通过模态分析,容易得到结构的自然频率和模态形状。如图 10 和图 11 所示为实际加工的气浮导轨前两阶模态仿真结果,自然频率分别为 1115.5Hz 和 1449.2Hz。基于以上分析结果,气浮导轨的一阶频率为 1115.5Hz,远大于工作频率 50Hz,可见系统具有很高的工作带宽。

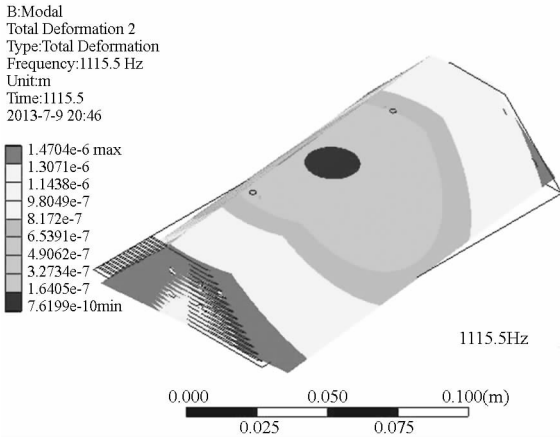


图 10 气浮导轨的一阶模态变形

Fig. 10 The first order mode shapes of the air slide

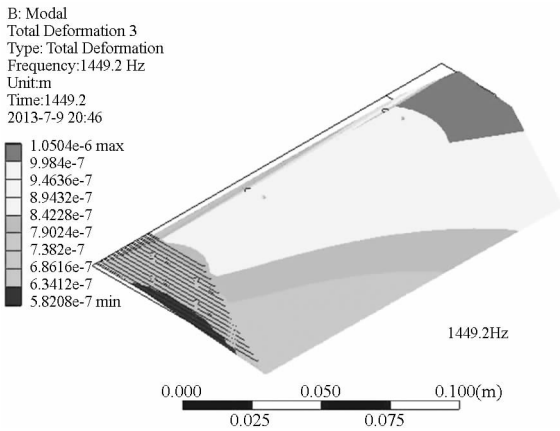


图 11 气浮导轨的二阶模态变形

Fig. 11 The second order mode shapes of the air slide

### 1.2 控制系统构建

系统前期使用 UMAC 控制器和高精度、低噪声的线性电流放大器来驱动音圈电机。UMAC 是模块化的控制器,可以安装不同的 CPU、伺服接

口、I/O 以及通信模块。在控制结构中,线性电流放大器将输入电压转换为输出电流,其增益比调节范围为 0.6 ~ 1.8A/V。控制器的位置反馈来自于 Heidenhain 直线光栅反馈,精度可达 ±0.5μm,信号周期为 2μm。光栅尺安装于气浮导轨非工作面上,刀具与线性编码器成一条直线用来消除位置测量中的阿贝误差。控制系统中高分辨率编码器细分模块可以实现信号周期 4096 倍的细分,并且不产生延迟,从而系统分辨率可达 0.5nm。FAS 闭环控制系统的示意图如图 12 所示,依据各部分的功能可分为控制部分、伺服系统、FAS 本体。

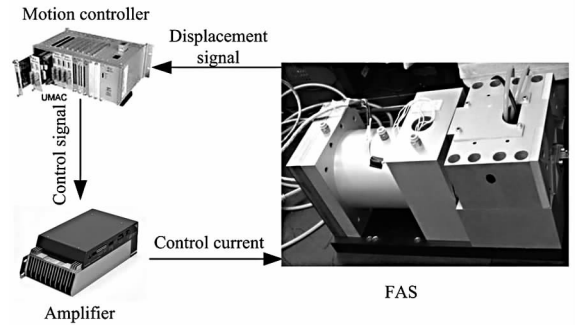


图 12 闭环控制系统示意图

Fig. 12 Schematic of the closed-loop control system

## 2 控制器设计

### 2.1 系统控制结构

在控制理论中,反馈校正与前馈控制相结合的复合控制是提高伺服系统轨迹跟踪精度的常用方法,采用速度前馈可有效提高控制器速度环的动态特性,提高系统的响应速度。加速度前馈则可以减小速度前馈带来的超调量,在不影响伺服系统绝对稳定性的前提下提高控制器的轨迹跟踪精度<sup>[12]</sup>。UMAC 运动控制器内部提供了标准的 PID 伺服控制算法,并在此基础上增加了速度/加速度前馈,用以减小系统的跟踪误差,并且支持用户根据自己的需要开发伺服控制算法。同时增加了陷波滤波器,改善系统的伺服性能。UMAC 伺服控制原理如图 13 所示。

UMAC 控制器中 PID 调节有关变量对系统性能的影响: $K_p$ : 伺服环的比例增益,影响系统的刚性。 $K_d$ : 伺服环的微分增益,给系统提供阻尼。 $K_i$ : 伺服环的积分增益,减小系统的稳态误差。 $K_{vf}$ : 伺服环的速度前馈增益,减小系统的跟踪误差。 $K_{af}$ : 伺服环的加速度前馈,消除系统在加减速时的跟踪误差。 $IM$ : 积分模式开关。 $n_1, n_2, d_1, d_2$ : 通过调整陷波滤波器各系数的值,可以过滤掉

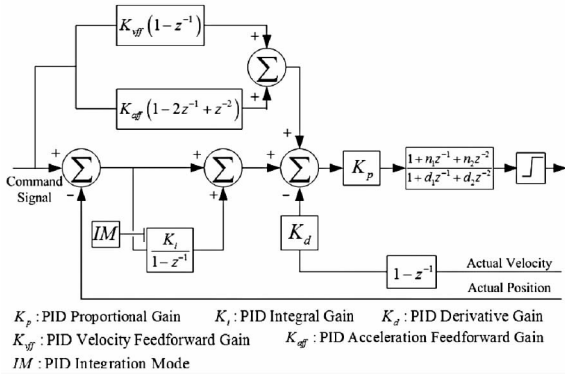


图 13 系统的控制器结构图

Fig. 13 Block diagram of FAS controller

驱动信号中与系统固有频率相近的频率信号分量,避免引起共振现象,提高系统的抗干扰能力<sup>[13]</sup>。

### 2.2 控制器调节

位置阶跃响应主要用来调整系统的 PID 参数,系统的阶跃响应性能体现了系统动态特性的优劣。评估系统阶跃响应性能的指标有上升时间、最大超调量和稳态时间。对于一个系统,希望上升时间和稳态时间尽可能短,超调尽可能小。图 14 为控制系统 0.1mm 阶跃响应实验所测得曲线,从图中可以看出,系统的上升时间为 2ms,最大超调量为 0.4%,稳态时间为 4ms,可见系统具有很高的响应速度。

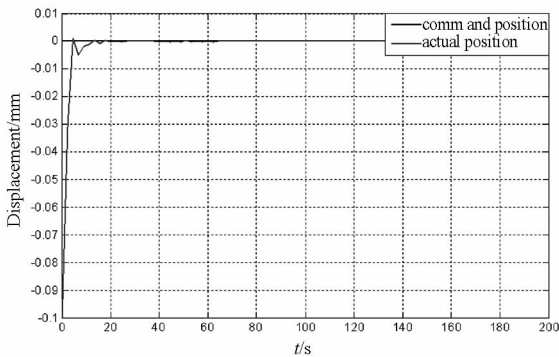


图 14 FAS 系统的阶跃响应

Fig. 14 Step response of FAS

对于没有前馈的位置伺服系统来说,跟踪误差总是与速度、加速度相关的,引入速度前馈和加速度前馈,可以减小跟踪误差。判定控制系统跟踪特性优劣的指标是跟踪误差。对于一个系统来说,希望跟踪误差尽可能地小,并在零附近均匀分布<sup>[14]</sup>。图 15 为系统工作在 1mm、10Hz 时的跟踪误差曲线。从图中可以明显看出加入速度/加速度前馈的复合 PID 控制系统对信号的跟踪能力更好,系统的跟踪误差得到明显改善,但仍需进一步深入研究来改进系统运动跟踪能力,包括先进

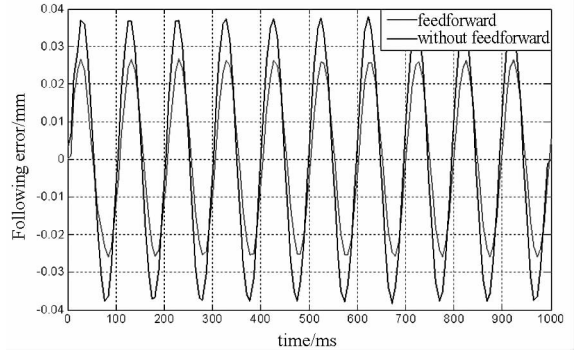


图 15 系统跟踪误差比较

Fig. 15 The compare of system following error

运动控制算法以及消除外界干扰和噪声等的研究。

### 3 加工实验

为了检测 FAS 系统的刚度以及伺服性能,进行了平面切削加工实验。实验是将快轴伺服系统安装在超精密金刚石车床上进行的(如图 16 所示),工件材料选定为硬铝(牌号:6061),刀具为天然单晶金刚石车刀。切削条件为主轴转速 500r/min,横向进给速度为 3mm/min(6μm/rev),切削深度为 5μm,刀具圆弧半径为 0.5mm,切削液为油基液。工件加工完成后,用 ZYGO 白光干涉仪对工件的表面粗糙度进行测量,测量结果为 Ra24nm,如图 17 所示。

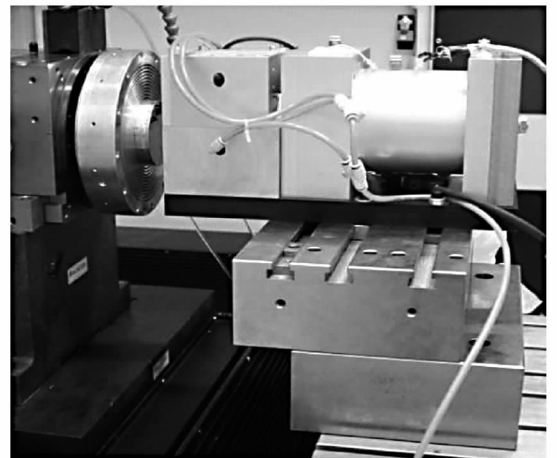


图 16 FAS 系统安装于金刚石车床上加工示意图

Fig. 16 FAS mounted on diamond turning machine with cutting

### 4 结论

通过结构设计优化、制造以及装配调试,研制了一种基于音圈电机驱动与气体静压轴承相结合的快速刀具伺服装置—快轴伺服系统。系统以 UMAC 运动控制器为控制平台,实现了速度/加

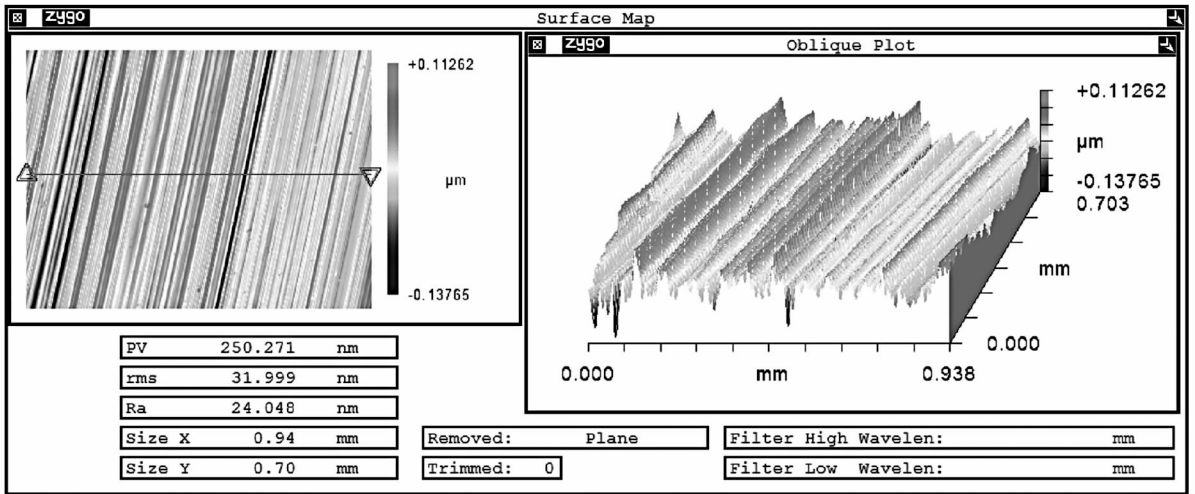


图17 切削铝件 ZYGO 测量图像表面粗糙度 (Ra24nm)

Fig. 17 ZYGO image of surface finish (Ra24nm) on a aluminum flat

速度前馈复合 PID 伺服控制算法,使其参数调节更加简单,满足了快轴伺服系统的稳定性、快速性、准确性、抗干扰性的控制要求。

实验结果表明,系统的末端负载静态刚度为  $30\text{N}/\mu\text{m}$ , FAS 系统样机对铝件进行平面切削的表面粗糙度值可达 Ra24nm,为今后该系统在实际加工中更广泛的应用(渐进多焦点镜片等复杂面形零件或结构的精密高效加工)研究打下了坚实的基础。同时,针对系统改进的控制算法需要进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] 朱志伟,赵绍昕,王刚,等. 快速刀具伺服分数阶 PID 控制仿真的研究[J]. 机电工程,2010,27(8):6-9.  
ZHU Zhiwei, ZHAO Shaoxin, WANG Gang, et al. Simulation of fast tool servo control based on fractional PID controller[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(8):6-9. (in Chinese)
- [2] Heinrich M, Wildsmith C. Need for precision engineering in astigmatic contact lenses [EB/OL]. www.aspe.net/publications/Winter\_2004/PAPERS.
- [3] Douglas S. A machining system for turning non-axisymmetric surfaces[D]. University of Tennessee, 1983.
- [4] http://www.satisloh.com/html.
- [5] Chen Q. Control of a fast long range actuator for diamond turning[D]. North Carolina State University, 2009.
- [6] Sebastian Scheiding, Allen Y. Yi, Andreas Gebhardt, et al. Freeform manufacturing of a microoptical lens array on a steep curved substrate by use of a voice coil fast tool servo [J]. Optics Express, 2011, 19(24):23938-23951.
- [7] 田富竟,快轴伺服系统关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2011.  
TIAN Fujing, Research on the key technologies of fast axis servo system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 徐新行,王兵,韩旭东,等. 音圈电机驱动的球面副支撑式快速控制反射镜设计[J]. 光学精密工程,2011,19(6):1320-1326.  
XU Xinxing, WANG Bin, HAN Xudong, et al. Design of fast-steering mirror with spherical pair supporting structure driven by voice coil actuators[J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19(6):1320-1326. (in Chinese)
- [9] Ge P, Jouaneh M. Modeling hysteresis in piezoceramic actuators[J]. Precision Engineering, 1995, 17(3):211-232.
- [10] Li Chuntao, Tan Yonghong. A neural networks model for hysteresis nonlinearity [J]. Sensors and Actuators, 2004, 7112(3):49-54.
- [11] 胡元,基于音圈电机的快速伺服刀具驱动装置研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
HU Yuan, Research on fast tool servo drivers using voice coil motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 张刚,刘品宽,张波,等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. 光学精密工程,2013,21(2):371-379.  
ZHANG Gang, LIU Pingkuan, ZHANG Bo, et al. Design of trajectory tracking controller for precision positioning table driven by linear motor [J]. Opt. Precision Eng., 2013, 21(2):371-379. (in Chinese)
- [13] 徐战波,李增强,孙涛. 基于 UMAC 的高精度空气静压主轴控制系统研究[J]. 航空精密制造技术,2010,46(4):28-30.  
XU Zhanbo, LI Zengqiang, SUN Tao. Study of CNC system of high precision aerostatic bearing based on UMAC [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(4):28-30. (in Chinese)
- [14] 宋涛,张清泉,张勇,等. 基于 PMAC 的直线电机进给控制系统研究[J]. 航空精密制造技术,2009,45(5):22-25.  
SONG Tao, ZHANG Qingquan, ZHANG Yong, et al. Research of feed control system for linear motor based on PMAC [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(5):22-25. (in Chinese)