

文章编号 1004-924X(2015)增-0410-07

超精密切削机床机电系统设计及其 Fresnel 透镜模具切削实验

李朝将, 高兴, 李勇*, Duong Cam Vinh

(清华大学 机械工程系 精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室/
摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了加工微小沟槽的非涅尔透镜模具, 设计了配置 B 转台的超精密切削机床机电系统并研究了相关工艺。介绍了机床机构模块, 设计了驱动及反馈环节。采用直线电机直接驱动的方式, 将 Heidenhain 纳米级分辨率光栅信号通过驱动器细分后, 反馈给数控系统, 构成全闭环控制。设计了超精密切削机床数控系统, 该系统采用开放式全软件型 PA 数控系统。机床两直线轴组装后导轨直线度达到 $0.15 \mu\text{m}/200 \text{ mm}$, B 转台角位移分辨率达到 $0.036''$, 定位精度为 $3''$ 。在机床上进行了直径 280 mm 平面、100 mm 半球面、高次曲面切削实验。利用机床的 B 轴旋转功能, 开发了非涅尔透镜模具 B 轴旋转加工方法。加工后平面试件的表面粗糙度 R_a 可达 5 nm, 非涅尔透镜模具的表面粗糙度 R_a 为 7.3 nm。实验验证了基于高精度 B 轴旋转加工非涅尔透镜模具的工艺可行性。

关键词: 超精密切削机床; 机电系统; PA 数控系统; 镜面加工; 非涅尔透镜; 模具加工

中图分类号: TG502; TG506.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0410

Electromechanical system in ultra-precision cutting machine tool and its application in processing of Fresnel lens mold

LI Chao-jiang, GAO Xing, LI Yong*, DUONG Cam Vinh

(Beijing Key Laboratory of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipments and Control/
State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: liyong@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: For processing micro groove Fresnel lens mold, the cutting technology and electromechanical system of an ultra precision cutting machine tool with a B rotary axis were designed. Mechanical modules of the machine tool were presented, and a motor drive and an encoder feedback system were designed. By applying linear motor direct drive, the Heidaenhain nano-scale linear encoder signal subdivided by the motor driver was used for closed-loop feedback. Electric control system of the ultra precision cutting machine tool was designed, of which the NC system was open whole soft type PA NC. The straightness error of a guide is $0.15 \mu\text{m}/200 \text{ m}$. For the B rotary axis, its positioning accuracy is $3''$, and the rotary displacement resolution is $0.036''$. In the cutting experiments, flat surface ($\Phi 280$

收稿日期: 2015-04-03; 修订日期: 2015-05-12.

基金项目: 北京市自然科学基金重点资助项目(No. 3131003); 摩擦学国家重点实验室自主研究课题资助项目(No. SKLT2013C01)

mm), semi-sphere ($\Phi 100$ mm), complex curved surface was machined. And the Fresnel lens mold was processed by the method of rotary B-axis. The experiments show that the surface roughness R_a of flat surface is 5 nm, and the surface roughness R_a of Fresnel lens mold is 7.3 nm. The results show that it is feasible that the process technology of Fresnel lens mold is based on the high precision rotary B-axis.

Key words: Ultra precision cutting machine tool; Electromechanical system; PA Numerical Control (NC) system; Mirror finish; Fresnel lens; mold processing

1 引言

随着科学技术的发展,军事和高技术领域对高精度光学元件的需求量越来越大,对精度要求也越来越高^[1-2]。菲涅尔透镜广泛应用于太阳能聚光系统、高性能光学成像系统等领域。菲涅尔透镜常采用光刻技术、激光直写法、电子束直写法等制作台阶型轮廓结构代替连续面型,加工过程复杂、耗时较长,对器件衍射效率有较大影响。另一方面,采用玻璃切割、磨削、抛光等方法加工菲涅尔透镜效率低且成本高^[3]。而单点金刚石超精密切削是各类菲涅尔透镜有效加工方法之一,可一次切削出光学级表面,省去了研磨、抛光等加工效率低的耗时工序,同时提高了光学元件的加工精度和表面质量^[3-4]。单点金刚石超精密切削技术采用刃口锋锐的天然金刚石刀具,配备多轴数控超精密加工机床,可以重复加工各种复杂的非球曲面和微小沟槽器件。

超精密加工机床的研制始于 20 世纪 60 年代,20 世纪 80 年代美国 LLNL 实验室开发了一系列超精密实验研究型机床^[5-6]。美国 Precitech 公司的 Nanoform 系列和 Moore 公司的 Nanotech 系列超精密机床基本代表了当今商品化超精密机床的技术水平^[7-8]。Precitech 公司推出的 Nanoform X,机床可以配置成 2~4 轴^[7],车削加工的表面粗糙度 $R_a < 1$ nm。X、Z 轴直线度均可达到 $0.2 \mu\text{m} / 220$ mm 和 $0.05 \mu\text{m} / 25$ mm。回转 B 轴的位置反馈分辨率为 $0.004''$,定位精度 $\pm 1''$ 。日本生产超精密机床的典型代表为 Fanuc 公司生产的 ROBONANO α -oiB 五轴超精密机床^[8],主轴回转精度为 $0.05 \mu\text{m}$,X、Z、Y 轴的位移分辨率为 1 nm,X、Z 轴的最大移动速度 500 mm/min,Y 轴的最大移动速度 50 mm/min,X 轴直线度为 $0.2 \mu\text{m} / 280$ mm。可以超精密高效地加工各种微细沟槽,表面粗糙度 R_a 达 2.36 nm。

我国一些研究机构及高等院校对超精密加工

机床及其关键部件做了大量的研究,如北京机床研究所、长春光机所、哈尔滨工业大学、国防科技大学,并取得了一定的进展及成果^[9-11]。但在机床的整体性能和关键部件制造水平方面与国外有较大的差距,机床的加工精度和加工稳定性有待进一步提高^[1-2]。

本研究在外合作的基础上,搭建超精密切削加工试验平台,进行了配置 B 转台的超精密切削机床机电系统设计,并对复杂光学器件的加工工艺进行探索,进行了 B 轴旋转的菲涅尔透镜模具加工方法的研究。

2 超精密机床的驱动与反馈环节

传统的精密数控机床只有 3 个轴:C 轴和 2 个水平直线轴 X、Z。随着光学精密模具复杂曲面的形貌精度要求越来越高,传统的精密 3 轴数控机床难以满足要求。本文研究的超精密机床配置了 B 转台,可以利用 B 旋转轴进行复杂曲面加工,减少加工程序代码数量。机床采“T”型布局,X、Z 轴分离,机床整体刚度较高,控制相对容易,机床的实物照片如图 1 所示。主轴采用了气体静压主轴,支撑部分采用双半球式气浮轴承结构,起到了径向和轴向推力轴承的作用。高压空气膜具有均化误差作用,主轴可以达到较高的回转精度,

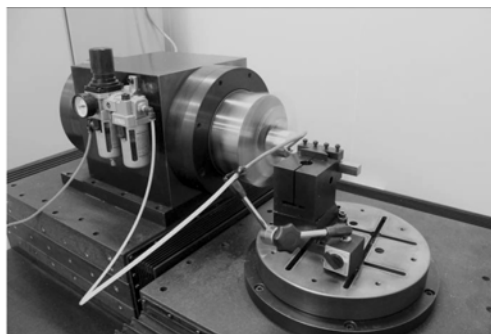


图 1 4 轴超精密机床

Fig. 1 4-axis ultra precision machine tool

该主轴的回转精度达 $0.05 \mu\text{m}$ 。导轨采用平面型封闭式气浮型导轨,由于导轨支承部是平面,可以获得较大的支承刚度,加工过程中摩擦小。两直线轴组装后导轨直线度达到 $0.15 \mu\text{m}/200 \text{mm}$,位移分辨率为 2nm 。

超精密切削机床全闭环控制框图如图 2 所示,采用直线电机直接驱动工作台,利用 Heidenhain 纳米级分辨率光栅反馈信号进行全闭环控制。图 3 所示为超精密机床的控制环路。由于采用直线电机,电流环在驱动器内部形成,利用外部的光栅的反馈信号,形成速度环。将光栅的反馈信号细分后,传输至数控系统,形成位置环。超精

密机床利用驱动器自身的细分功能,位置反馈信号细分与提取速度信号都由伺服驱动器完成,可尽量保证细分后的位置信号和提取出的速度信号一致性。

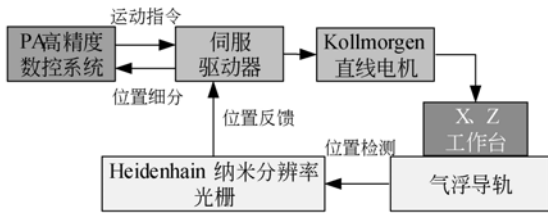


图 2 机床全闭环控制框图

Fig. 2 Block diagram of closed-loop control of the machine tool

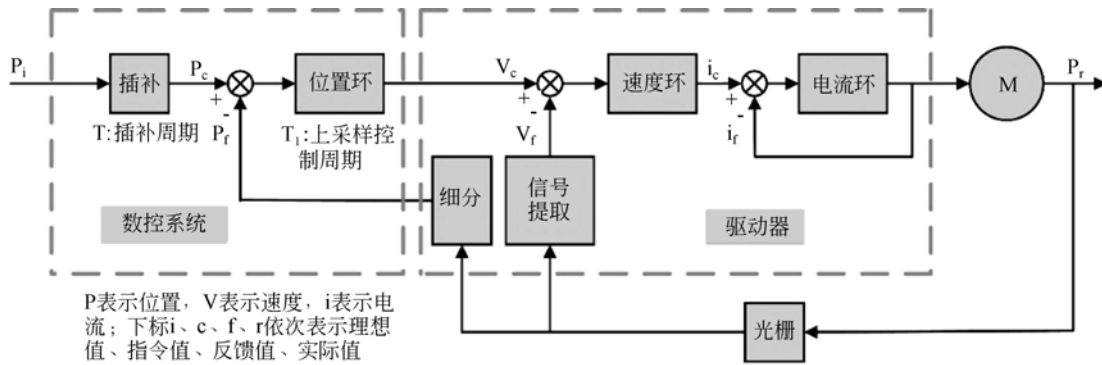


图 3 超精密机床的控制环路

Fig. 3 Control circuit of the machine tool

机床的主轴配置了 Kollmorgen 的无框电机,定位精度 $5''$,最高转速 $4\ 000 \text{rpm}$ 。机床定位在中小口径加工范围,加工过程负荷和行程较小,X、Z轴选择 Kollmorgen 的直线电机直接驱动大理石工作台,动态特性好。且减少电机到导轨的中间环节带来的误差,提高了传动效率。4根轴都配有 Heidenhain 高精度光栅,B轴为 ERA4000 系列圆光栅,通过细分后,最终 B 转台的角位移分辨率达到 $0.036''$,精度达 $3''$ 。X、Z轴为 LIP 系列光栅,采用干涉扫描原理,精度和重复精度高。光栅的分辨率决定着系统中位置反馈分辨率,位置反馈分辨率影响着机床的最大进给速度。

假设位置反馈的分辨率为 T ,机床的进给速度为 F ,光栅的采样频率为 f_1 ,则 1s 内信号传输频率 f_2 为:

$$f_2 = [F \times 10^6 / (T \times 60)] / 10^6 = F / (T \times 60), \quad (1)$$

需满足 $f_1 \geq f_2$,得出进给速度 F :

$$F \leq f_1 \times T \times 60. \quad (2)$$

由式(2)可知在光栅采样频率一定情况下,位置反馈分辨率决定机床的最大进给速度。X、Z轴的光栅采样频率为 1MHz ,结合超精密机床加工时的进给速度和加工精度,通过设置驱动器的细分倍数,将位置反馈分辨率设置为 4nm ,机床的最

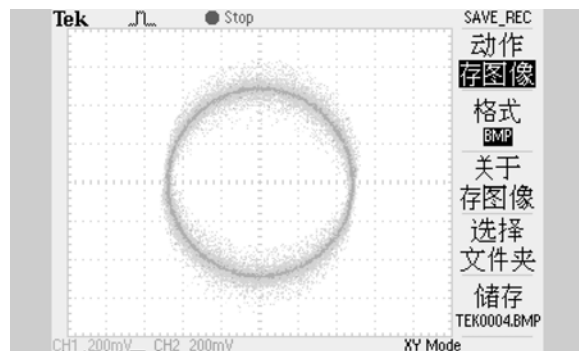


图 4 光栅 A、B 信号的 X-Y 图

Fig. 4 X-Y mode picture of encoder A, B signal

大进给速度为 240 mm/min,满足加工需求。

图 4 所示为加工时光栅信号的 X-Y 图,是光栅中相位相差 90°的 A、B 正弦信号通过示波器合成得到,从图中看出,光栅信号图形完整、无显著毛刺;幅值约为 0.95 V_{pp}、相位误差 ≤ ± 2°。表明机电系统中的光栅信号抗干扰能力较强,可保证纳米级精度的信号准确传输。

3 超精密机床的数控系统

超精密机床数控系统的特点是编程分辨率(1 nm)和插补运算相当频繁,要求数控系统及时地处理各轴反馈的位置信号。在高编程分辨率条件下满足高质量切削条件,插补周期极短,达到毫秒级^[4]。

该超精密切削机床采用了全软件型开放式数控系统 PA8000,利用其开放接口和成熟的应用功能,在 Windows XP 操作系统基础上搭建 4 轴超精密切削机床数控系统。PA 数控是基于 PC 架构,采用 RTX 实时内核,具有较高的编程分辨率(1 nm),数控系统的位置控制循环周期为 1 ms。PA 数控系统分为人机接口(HMI)、CNC、PLC 3 个模块,分别完成数控机床的人机界面控制、NC 控制和 PLC 控制^[12],如图 5 所示。这 3 个模块都提供一些开放接口,根据机床功能的需要,进行 3 个模块不同程度的开发。对于实时性要求高的运动控制和逻辑控制任务,由在内嵌的 RTX 实时内核上的 CNC 软件完成,并直接控制相关的硬件设备。CNC 内核由 CNC 解释器、插补器和位置控制器组成,解释器对用户的 NC 代码进行解释,插补器是系统的执行单元,位置控制模块用于实现轴的位置控制。实时性不高的任务 HMI 由操作系统来实现,PLC 通过专用接口控制 CNC。PA 系统提供的循环编译工具(Compile Cycles)允许用户根据自己的需要进行其他加工功能的开发,可以深入地介入到 CNC 工作的各个阶段,包括 CNC 编译器和插补器^[12]。系统兼容 PA Superbus 总线,支持多轴和更多 I/O 口的扩展。

PA8000 数控系统的运动控制和逻辑控制功能都由软件实现,数控系统的硬件只有工控主机、接口模块、显示器、NC 操作面板等部件组成。工控主机通过 PA 总线与接口模块通讯,控制数字

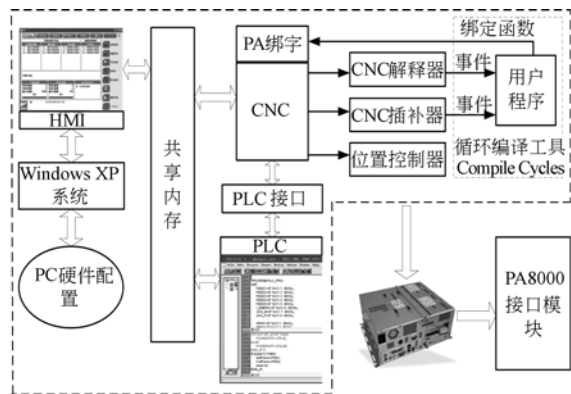


图 5 PA 数控系统软件结构

Fig. 5 PA NC system soft framework

量 I/O 设备、模拟量 I/O 设备、电子手轮以及各轴状态指示功能。PA8000 接口模块根据工控主机的伺服进给命令,进行 16 位的 D/A 转换,通过模拟量的方式,以差分输出形式连接伺服驱动器,控制各轴的电机运动。各轴的光栅信号通过驱动器反馈给数控系统,进行高精度的全闭环控制。

4 超精密切削验证实验

为了测试搭建的超精密切削试验平台的加工性能,进行超精密切削实验。测试机床全行程中加工一致性,进行了平面(Φ280 mm)镜面加工。采用天然金刚石圆弧刀具(圆弧半径为 R=2 mm),主轴转速 800 rpm,进给速度 6 mm/min,切深 2 μm。加工的平面实物如图 6 所示,表面粗糙度 Ra 为 5 nm。

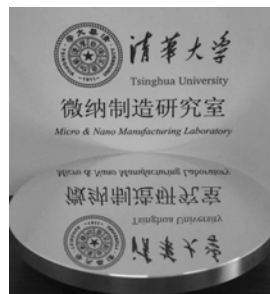


图 6 平面加工件

Fig. 6 Flat surface

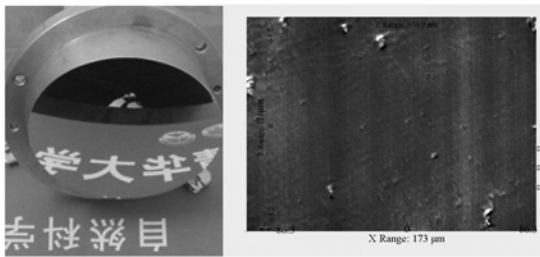


图 7 球形加工件

Fig. 7 Spherical surface

为了验证机床的数控拟合加工能力、插补精

度,进行半球拟合加工($\Phi 100$ mm)。主轴转速 1 000 rpm,进给速度 4 mm/min,切深 $1.5 \mu\text{m}$,样条拟合距离为 $0.5 \mu\text{m}$,加工实物如图 7 所示,达到镜面加工的效果。为了验证机床的复杂曲面加工能力,机床的综合加工能力,在该超精密切削机床上进行复杂曲面的镜面加工。采用天然金刚石圆弧刀具(圆弧半径 $R=2$ mm),主轴转速 1 000 rpm,进给速度 6 mm/min,切深 $3 \mu\text{m}$,润滑方式为油雾润滑。复杂曲面的加工件如 8 所示,高次曲面的扫描白光干涉仪的检测图片如图 8(b)所示,表面粗糙度 R_a 达 9 nm。



(a) 高次曲面 (b) 白光干涉仪照片
(a) Complex curved surface (b) Photo of white light interferometer

图 8 高次曲面加工

Fig. 8 Complex curved surface processing

5 B 轴旋转菲涅尔透镜模具的加工

菲涅尔透镜模具是具有微小沟槽结构的超精密光学模具,由一系列同心环带构成。采用单点金刚石切削加工菲涅尔透镜球面有拟合加工和切线加工两种方法^[13-14]。拟合加工方法利用超精密加工机床的 2 个平动轴的联动形成圆弧插补切削轨迹,从而实现菲涅尔透镜上球面的加工。切线加工方法利用超精密加工机床的 2 个平动轴和 B 旋转轴的三轴联动获得始终沿圆弧切线的切削轨迹,实现菲涅尔透镜上圆弧面的加工。

然而,在上述两种方法中获得的加工圆弧均为近似圆弧,存在轨迹误差。因此,基于该机床的高精度 B 旋转轴,提出了一种 B 轴旋转加工方法进行菲涅尔透镜形状的圆弧加工,提高菲涅尔透镜的表面形状精度。菲涅尔透镜模具的沟槽是由多个圆弧合成,圆弧中心点的横向坐标是相同的,纵向距离(菲涅尔透镜的沟槽高度)通过菲涅尔透镜的形状设计公式确定。根据菲涅尔透镜模具的

特点,可以利用 B 轴旋转来加工圆弧面^[15]。B 轴旋转方法示意图如图 9 所示。首先将刀尖调节至离转台 B 旋转轴中心距离为 R 的位置。旋转 B 轴一个角度 α_{n-1} (α_{n-1} 是根据菲涅尔透镜的形状计算出来),即加工出 C_{n-1} 的圆弧面,然后 Z 方向进给一段 Δh_{n-2} (根据菲涅尔透镜的形状设计计算出来),加工 C_{n-2} 的圆弧面,重复上述步骤即可加工出菲涅尔透镜模具的形状。该方法加工过程为连续路径,加工时刀具的主偏角保持不变,刀具形状可根据最小的棱角形状设计,提高刀具的刚度。

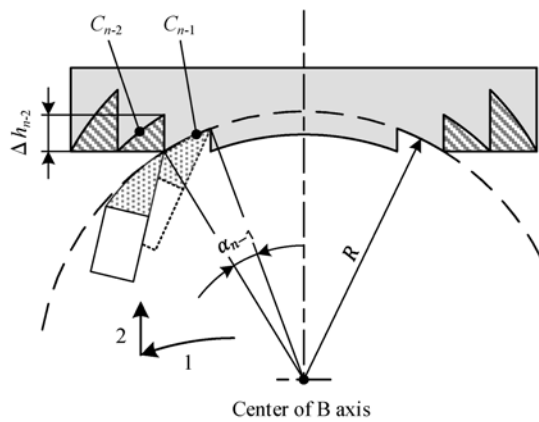


图 9 菲涅尔透镜模具加工示意图

Fig. 9 Machining diagram of Fresnel lens mould

B 轴旋转加工方法需要进行 B 轴对刀,即确定单点金刚石刀具的刀尖点到 B 轴圆心的实际坐标。基于 3 点坐标确定圆心的原理提出可量化对刀方法。如图 10 所示,设刀尖的第 1 个位置为坐标原点 $A(0, 0)$, B 轴圆心的坐标为 $O(a, b)$,由第 1 个位置点 A 旋转确定的角度 α 至第 2 个位置点 $B(x_2, z_2)$ 。从第 2 个位置点 B 旋转至第 3 个位置点 $C(x_3, z_3)$ 的角度也等于 α ,且 x_2, x_3 为正值。A、B、C 3 点坐标与 B 轴圆心 O 坐标的关系为:

$$\begin{aligned} a^2 + b^2 &= R^2, \\ (x_2 - a)^2 + (z_2 - b)^2 &= R^2, \\ (x_3 - a)^2 + (z_3 - b)^2 &= R^2, \end{aligned} \quad (3)$$

B 点与 C 点的 x 坐标可写成:

$$x_2 = \sqrt{(2R\sin(\alpha/2))^2 - z_2^2}, \quad (4)$$

$$x_3 = \sqrt{(2R\sin(\alpha))^2 - z_3^2}. \quad (5)$$

将式(3)(4)代入方程组(2),即求得 B 轴圆

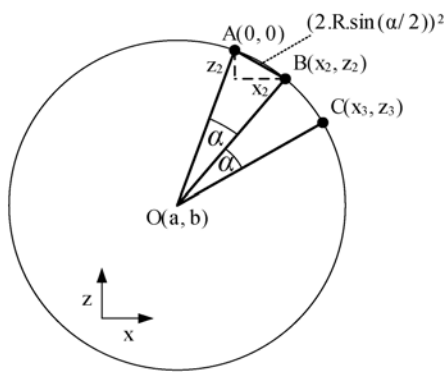


图 10 可量化对刀方法
Fig. 10 Measurable tool alignment

心 O 的坐标, a, b 与 z_2, z_3, α 的关系如下:

$$a = \frac{1}{4} \frac{4z_2 \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) - z_3}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

$$b = -\frac{1}{4} \frac{-z_3 - 2z_2 + 4z_2 \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (6)$$

由于角度 α 是已知量,再测量出第 2 点、第 3 点与第 1 点的 z 方向的距离 z_2, z_3 ,即可求出圆心的坐标。 z_2, z_3 大小可以通过试切方式、对刀仪或在线图像识别方法得到。该方法测量的参数较少,减少了测量误差对最终距离的影响。

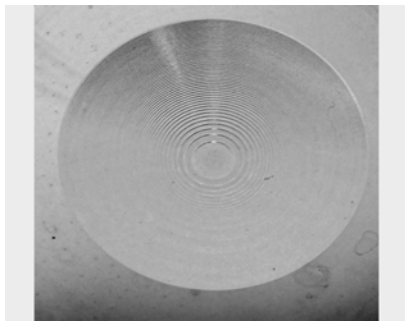


图 11 菲涅尔透镜模具
Fig. 11 Fresnel lens mould

根据菲涅尔透镜模具的微小沟槽特点,使用设计的天然金刚石半圆刀,刀具的一边为圆弧刃,一边为直线刃,圆弧刃半径为 80 mm。通过在线图像识别的方法进行 B 轴对刀, B 轴旋转速度 $40^\circ/\text{min}$, 主轴转速 1 000 rpm, 进给速度 4 mm/min。菲涅尔透镜为等齿高,齿高 0.05 mm;透镜的环带宽度由内到外逐渐减小,最大宽度为 1.85 mm,最小 0.2 mm。加工的非涅尔透镜模具如图 11 所示,表面粗糙度 Ra 为 7.3 nm。实验结果表明 B 轴旋转真圆加工菲涅尔透镜模具的方法可行,同时验证了该超精密机床的 B 旋转轴的旋转精度较高,满足菲涅尔透镜模具的加工要求。

6 结 论

本文针对具有微小沟槽特点的非涅尔透镜模具光学镜面加工难点,进行了配置 B 旋转轴的超精密切削机床机电控制系统和单点金刚石超精密切削工艺的研究。采用开放式 PA 数控系统、Heidenhain 纳米级分辨率的直线光栅和圆光栅进行 X、Z、B 轴全闭环控制设计。利用直线电机驱动器自身的细分功能进行 X、Z 轴位置和 B 轴角度的反馈系统设计。最后,进行平面、球面、高次复杂曲面切削验证实验,并提出 B 轴旋转的非涅尔透镜模具的加工方法和可量化对刀方法。实验结果表明,该超精密切削机床的 B 轴定位精度可达 $3''$,加工平面的表面粗糙度 Ra 可达 5 nm,具有球面、高次复杂曲面的镜面加工能力。加工的非涅尔透镜模具表面粗糙度 Ra 为 7.3 nm,表明基于高精度 B 轴旋转加工菲涅尔透镜模具的工艺可行性,该工艺对类似具有微小沟槽光学器件的加工具有参考价值。

参考文献:

[1] 李圣怡,戴一帆.超精密加工机床新进展[J].机械工业出版社,2003,39(8):7-14.
LI SH Y, DAI Y F. New development of the ultra-

precision machine tool [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003,39(8):7-14(in Chinese).
[2] 梁迎春,陈国达,孙雅洲,等.超精密机床研究现状与展望[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(5):28-39.
LIANG Y CH, CHEN G D, SUN Y ZH. et al.,

- Research status and outlook of ultra-precision machine tool [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(5):28-39. (in Chinese)
- [3] WANG Y, ZHAO Q, SHANG Y, *et al.*. Ultra-precision machining of Fresnel microstructure on die steel using single crystal diamond tool [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(12): 2152-2159.
- [4] 黄昆涛, 房丰洲, 宫虎. 超精密车削表面微观形貌对光学特性的影响[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(1): 101-107.
- HUANG K T, FANG F Z, GONG H. Effect of surface microscopic topology generated by ultra-precision turning on optical characteristics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):101-107. (in Chinese)
- [5] DONALDSON R R, PATTERSON S R. *Design and Construction of a large, vertical axis diamond turning machine* [R]. USA, Lawrence Livermore National laboratory report, 1985.
- [6] MOORE Nanotechnology Systems, LLC. Machines [EB/OL]. [2015-05-14]. <http://test.nanotechs.com/machines/>
- [7] AMETEK Precitech Inc. Nanoform X machine brochure [EB/OL]. [2015-04-26]. http://www.precitech.com/products/nanoform_x/nanoform_x.html.
- [8] FANUC Corporation. ROBONANO α -0iB machine brochure [EB/OL]. [2015-04-26]. [http://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/robonano/ROBONANO%20a-0iB\(E\)_v10.pdf](http://www.fanuc.co.jp/en/product/catalog/pdf/robonano/ROBONANO%20a-0iB(E)_v10.pdf).
- [9] 戴一帆, 彭小强. 超精密车床伺服进给机构设计研究[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(4):355-359.
- DAI Y F, PENG X Q. Design of servo-feed mechanism of ultra-precise lathe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(4):355-359. (in Chinese)
- [10] 张景和, 张顺国, 赵海潇, 等. 大型超精密机床导轨卸荷系统结构设计与测试[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(9):1383-1390.
- ZHANG J H, ZHANG G S, ZHAO H X, *et al.*. Structure design and test for guide unloading system of large ultra-precision machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1383-1390. (in Chinese)
- [11] 郭隐彪, 杨炜, 王振忠, 等. 大口径光学元件超精密加工技术与应用[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(19): 171-178.
- GUO Y B, YANG W, WANG ZH ZH, *et al.*. Technology and application of ultra-precision machining for large size optic [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(19):171-178. (in Chinese)
- [12] 刘鹏. PA 数控系统中 HEXPOD 型并联机床控制模块开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- LIU P. *Development of HEXPOD mechanism module on PA CNC* [D] Harbin: Harbin institute of technology, 2009. (in Chinese)
- [13] 李荣彬, 孔令豹, 张志辉, 等. 微结构自由曲面的超精密单点金刚石切削技术概述[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(19):144-155.
- LEE W B, KONG L B, CHEUNG C F, *et al.*. An overview of ultra-precision diamond machining of microstructured freeform surfaces [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2013, 49(19): 144-155. (in Chinese)
- [14] YAN J W, OOWADA T, ZHOU T F, KURIYAGAWA T. Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. 209:4802-4808.
- [15] LI Y, LI C J, GAO X, *et al.*. Precise turning of Fresnel lens mold by using rotation of B-axis[C]. *The 15th International Conference on Precision Engineering*. Kanazawa, 2014:613-616.

作者简介:



李朝将(1985—),男,江苏宿迁人,博士后,助理研究员,2012年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为清华大学机械工程系博士后,主要从事超精密加工与特种加工工艺及装备方面的研究。
E-mail: lcj@mail.tsinghua.edu.cn



李勇(1962—),男,清华大学机械工程系教授,博士生导师,现主要从事微纳制造方面的研究:包括微细电加工工艺与装备、单点金刚石刀具超精密切削加工、以及微流控柔性 MEMS 蒙皮等方向。E-mail:liyong@mail.tsinghua.edu.cn