

文章编号 1004-924X(2018)07-1661-11

辊筒模具超精密机床系统设计与工艺

乔 政, 刘玉涛, 吴言功, 王 波, 张 鹏*
(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了提高国内大尺寸光学微结构薄膜的光学级模具制造水平, 打破国外在辊筒模具超精密加工装备的垄断, 完成了国内首台套大尺寸光学微结构辊筒模具超精密机床的设计、集成以及典型微结构工艺的研究工作。首先, 根据辊筒模具表面微结构加工工艺的特点, 分析了辊筒模具超精密机床的关键技术并完成了机床结构与运动控制系统设计。在机床系统集成后, 完成了运动控制系统的调试。直线轴执行阶梯运动完成了直线轴运动分辨率的测试。其次, 通过准直仪和激光干涉仪完成了机床关键轴系的直线度及定位精度的测试和补偿。最后, 采用多步切削法切削实验, 以降低毛刺高度为目标, 完成了 V 槽阵列的加工工艺参数优化。经测试, 该超精密加工机床的直线运动分辨可达到 5 nm, 直线轴的双向定位精度均优于 1 μm /100 mm; 采用多步切削法加工 V 槽阵列, 最后一次切削深度建议在 1~2 μm , 可以获得合格的 V 槽阵列。

关键词: 超精密加工机床; 金刚石切削; 辊对辊; 辊筒模具; 微结构

中图分类号: TG502 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182607.1661

Design and process of ultra-precision drum roll lathe

QIAO Zheng, LIU Yu-tao, WU Yan-gong, WANG Bo, ZHANG Peng*

(College of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: zp@hit.edu.cn

Abstract: In order to improve the domestic roll-to-roll manufacturing level of optical microstructure films and change the fact that the manufacture of nearly all ultra-precision roll machining equipment is monopolized by foreign companies, the first domestic ultra-precision roll lathe is designed and integrated successfully with process experiments for typical microstructures. First, according to the characteristics of optical microstructures for roller mold processing, the key technologies of machine tools were analyzed. From this analysis, the machine's structure and motion control system are designed. After integration of the machine tool system, debugging of the motion control system and linear axis motion resolution tests are carried out. Second, the straightness and positioning accuracy of each axis are measured and compensated using a collimator and laser interferometer. Finally, parameter optimization tests for reducing the burr height when manufacturing V-groove arrays are performed through a cutting experiment by using a multi-step cutting method. Experimental results indicate that the linear motion resolution of the ultra-precision machining lathe can reach 5 nm, full-stroke bi-directional positioning accuracy of the linear axis is better than 1 μm , and the V-groove micro-structure array processed with a final cutting depth of 1—2 μm has excellent surface quality.

Key words: ultra-precision machine tool; diamond cutting; roll to roll; drum roll lathe; microstructure

收稿日期: 2018-01-18; 修订日期: 2018-02-10.

基金项目: 国家科技重大专项 (No. 2011ZX04004-021); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51605119)

1 引言

微结构功能表面广泛地应用于液晶显示设备、聚光光伏系统、交通警示、裸眼 3D 等领域^[1-5]。为了满足上述领域对大面积微结构功能表面的低成本、高效率、高精度的制造需求, Roll-to-Roll(RTR)复制加工技术被看作是一种理想的工艺方法^[6],与电镀成型、注射成型、冲压等复制技术相比,RTR 超精密复制加工技术的优势在于:转印固化设备可以连续、不间断进行辊压,利用 UV 固化技术将辊筒表面的微结构转移到 PET 膜片上形成高品质光学膜。该方法辊压速度快,微结构膜片与辊筒模具易分离,良品率高,生产工序自动化程度高,具有无与伦比的制造效率。因此,RTR 的应用前景十分广阔^[7-8]。

RTR 生产工艺最为核心的技术就是光学微结构辊筒模具的加工,而辊筒模具超精密加工机床及金刚石切削技术是加工此类辊筒模具的重要手段,超精密加工技术可以使零件达到亚微米级的尺寸和形状精度,并同时获得光学质量表面,大大提高了产品的使用性能和可靠性^[9-10]。

辊筒模具超精密加工机床及相关加工技术是典型的高科技领域,它既是高代价、高投入的工艺技术,又是高增值、高回报的商业产品。纵观世界,先进的工业国家均对这一领域的发展给予了大量的政策和资金支持,把它放在国家科技和经济发展的关键位置,目前美国 Moore、Precitech、日本东芝、德国 Kugler 以及英国 Cranfield 等企业已经实现了该类机床的产品化。我国虽然已经成为世界制造大国,但是在高端装备制造领域的发展还较为落后,自主创新能力薄弱,尤其体现在以知识密集、多学科相交叉、高精尖技术相集成为特点的高端数控装备领域,与发达国家还有一定差距。因此,大尺寸微结构辊筒模具超精密机床的研制及相关超精密加工技术研究,不仅能够提升我国高端数控机床的研发能力,还会促进其它战略性新兴产业的发展,如新一代平板显示产业和太阳能光伏光热发电产业。

辊筒模具超精密加工的难点在于工件尺寸和重量大(可重达 1 000 kg)、切削时间和切削里程长、加工精度要求高。例如,增亮膜作为液晶显示面板背光模组中最关键的部件之一,为 V 型槽阵

列结构,其最小节距要求为 20 μm ,节距误差要求小于 $\pm 0.2 \mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 要求小于 10 nm^[11]。基于以上要求,本文详细分析了辊筒模具超精密加工机床系统的设计思路,并进行了机床调试与检测;通过微结构工艺优化实验,获得了高质量的微结构阵列。

2 辊筒模具超精密机床系统设计与集成调试

2.1 机床结构设计

辊筒模具超精密加工机床的结构如图 1 所示。机床结构采用 X-Z-B-C 四轴联动方案。X、Z 轴为直线运动轴,B 轴为角位移闭环控制的回转轴,C 轴既可以实现精确角位移定位又可以作为主轴高速转动。辊筒模具为空心圆柱结构,尺寸和重量较大,需要对其两端夹持。因此,机床具有两套主轴系统——头架主轴和尾架主轴。

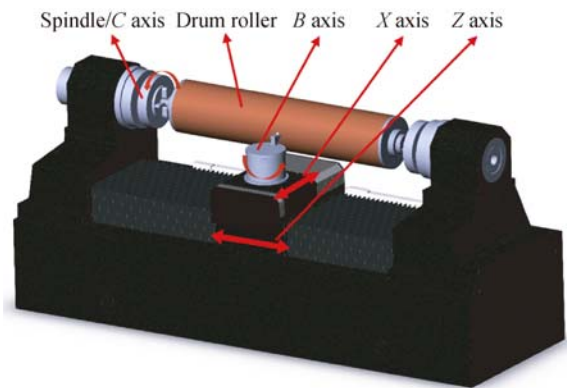


图 1 辊筒模具超精密的机床机械结构布局

Fig. 1 Layout of ultra-precision drum roll lathe

辊筒模具的超精密加工对主轴部件提出了大承载、高刚度、高回转精度、高分辨率、发热量小、无爬行现象等要求。国外机床为了满足辊筒模具大承载的需求,均采用了液体静压轴承,但加工时需要冷却单元实时控制液压油温度,以避免油膜剪切引起过大温升造成的加工误差。而本文辊筒模具超精密机床两套主轴系统均选用小孔节流型气体静压主轴,对其设计参数进行了精确计算,气体静压润滑保证了主轴具有高回转精度、极低摩擦系数及无爬行的特性。加大转子直径,增大主轴的径向承载面积,以满足高承载和高刚度的要求。优化气膜间隙,减小气膜剪切温升,同时增大

气体流量迅速带走热量,从而避免影响加工精度,保证主轴系统温度场的平衡稳定。采用大功率无框力矩电机直接驱动主轴转子,配合圆光栅构成高分辨率运动控制系统。该主轴控制系统具有开环主轴模式和闭环伺服模式两种工作模式。当主轴控制系统为开环主轴模式时,通过驱动器实现主轴速度闭环,保证不同转速下的速度平稳性;当主轴控制系统为角位移闭环伺服模式时,即 C 轴模式,主轴可以实现高分辨率的角位移运动控制,而且在低转速下运动时无爬行现象。图 2 为小孔节流型气体静压主轴。

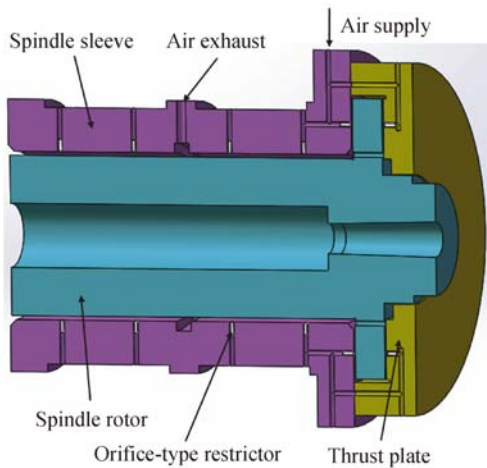


图 2 小孔节流型气体静压主轴

Fig.2 Aerostatic spindle with pocketed orifice-type restrictors

直线运动系统(X轴 & Z轴)为十字滑块式布局,X轴叠加在Z轴溜板上,均采用直线电机直驱液体静压导轨,图3为Z轴直线运动平台。直线电机的动子和定子无机械接触,并且电机线圈与溜板之间不存在传动间隙,因此具有驱动结构紧凑、响应速度快、运动精度高的特点,可以实现不同速度范围内的精密运动控制。

与回转部件相同,直线进给系统也同样需要考虑温度变化对加工精度的影响,国外机床进给系统均采用不锈钢作为结构材料,热膨胀系数高,对环境温度变化十分敏感,因此国外机床都采用高精度的温控单元对机床所在空间环境温度进行精密控制;例如美国 Moore 公司的 Drum Roll Lathe-2000 要求温控单元的供风温度波动在 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内^[12],成本十分高昂。因此,为了降

低热误差的影响,辊筒模具超精密机床进给系统、床身及支撑部件均选用低热膨胀系数的花岗岩作为结构材料,大大降低了机床对环境温度的敏感度。经实践检验,在环境温度波动 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,V槽阵列的节距误差优于某国外同类机床。辊筒模具超精密机床的详细特性参数如表 1 所示。

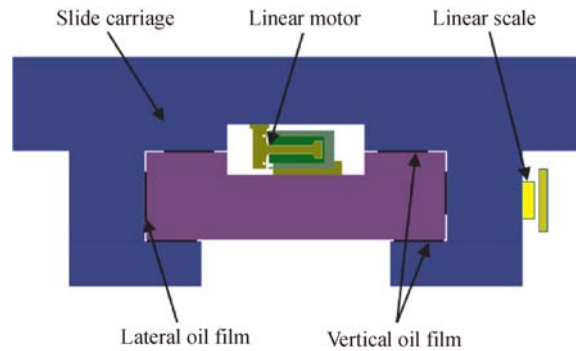


图 3 直线运动平台(Z轴)

Fig.3 Linear motion table(Z axis)

表 1 辊筒模具超精密机床的特性参数

Tab.1 Specifications of ultra-precision roller mold lathe

机床部件	特性	参数
辊筒模具	最大尺寸 (有效宽幅×直径)	2 000 mm×φ500 mm
	最大重量	1 000 kg
	分辨率	0.36"
主轴/C轴	最大速度	560 r/min
	分辨率	0.14"
B轴	最大速度	60 rpm
	行程	250 mm
X轴	分辨率	5 nm
	最大速度	1 800 mm/min
Z轴	行程	2 050 mm
	分辨率	1 nm
	最大速度	15 000 mm/min

2.2 运动控制系统的集成与调试

辊筒模具超精密机床构建的运动控制系统结构如图 4 所示。该控制系统结构主要包括位置环和电流环,位置环由 UMAC 控制器来实现,进行高精度位置定位,其中的微分环节大大减弱了运动过程中的位置突变现象,从而提高了运动速度的平稳性。电流环在驱动器中闭合,减小电流波动,保证平稳的力矩输出。

2.2.1 控制系统调试

UMAC 运动控制器的 PMACTuringPro 调试软件提供了基于反馈校正和前馈补偿结合的 PID 伺服控制策略,通过阶跃响应测试和抛物线速度响应测试等来验证机床运动控制系统的静态和动态性能。以 Z 轴伺服参数调试为例,先执行阶跃运动查看响应曲线,主要用来调整比例环节系数 K_p 与微分环节系数 K_d 。经过调试后,Z 轴阶跃响应如图 5 所示,调试后阶跃响应的上升时

间为 0.007 s,超调量为 5.2%,说明 Z 轴动态响应良好;并且,阶跃响应曲线与指令曲线的吻合性好,没有稳态误差,表明该伺服系统没有偏置负载。抛物线速度曲线响应用来调整伺服系统的前馈参数(速度前馈 K_{vff} 与加速度前馈 K_{aff})。图 6 所示为 Z 轴抛物线速度响应曲线,调整参数后 Z 轴抛物线响应过程中跟踪误差曲线 PV 为 9.30 cts (9.3 nm),反映出 Z 轴伺服系统具有良好的动态跟踪性能。

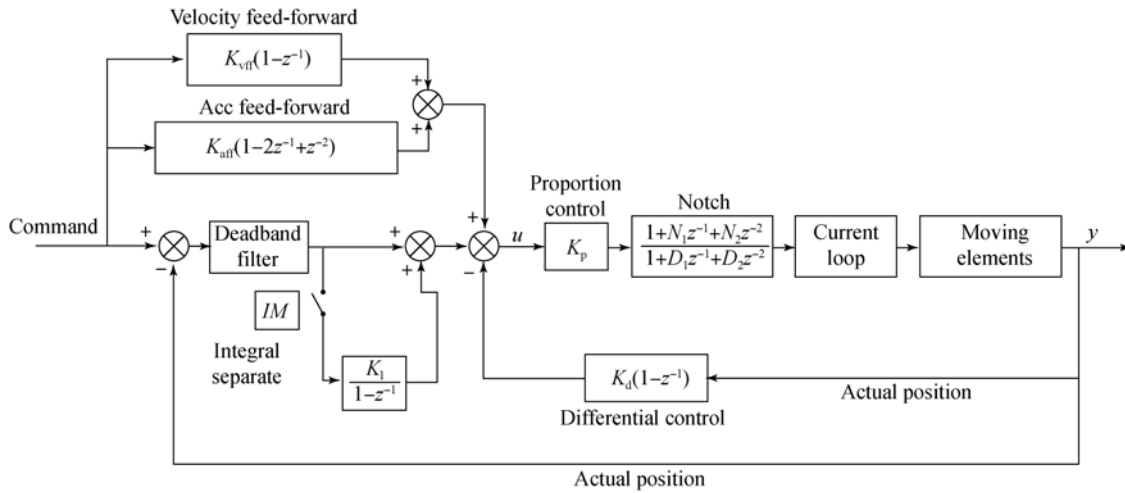


图 4 辊筒模具超精密机床的运动控制系统结构

Fig. 4 Schematic of motion control system for ultra-precision drum roll lathe

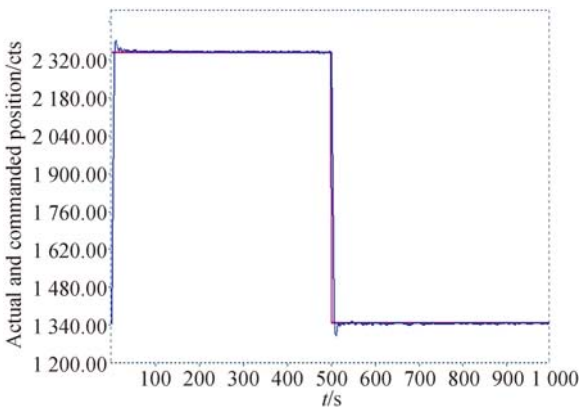


图 5 Z 轴阶跃响应

Fig. 5 Step motion response of Z axis

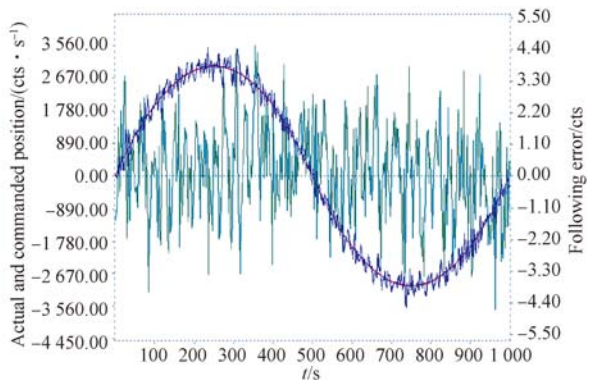


图 6 Z 轴抛物线速度响应

Fig. 6 Parabolic velocity response of Z axis

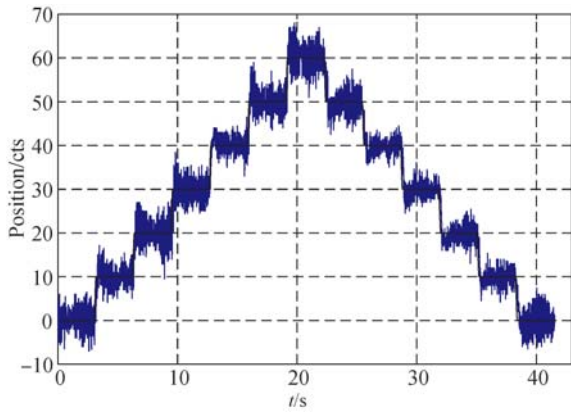
2.2.2 Z 轴运动分辨率测试

为了确保微结构阵列具有光学表面粗糙度和高的尺寸精度,直线轴的 Z 轴在加工过程中的定位稳定性和最小运动分辨率是至关重要的。运动分辨率越小,稳定性越好,也就更容易实现精细的

插补运动来满足高精度的加工要求。

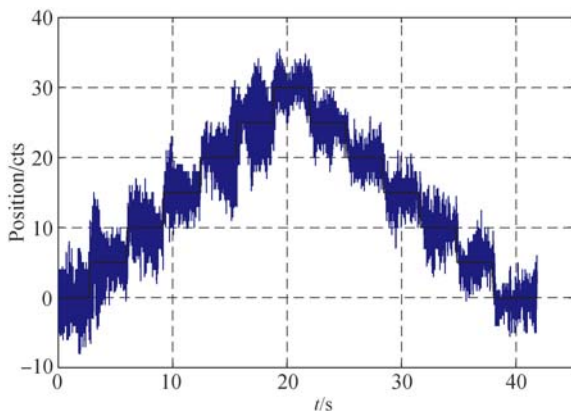
运动分辨率的影响因素很多,包括传动机构的摩擦、位移反馈分辨率、振动大小以及控制系统噪声等,因此该指标能够综合多方面因素体现运动系统的性能。采用阶梯运动测试的方法评估

Z轴的运动分辨率。图 7 所示为阶跃进给量分别为 10 nm 和 5 nm 时的运动分辨率,每次阶跃进给完成后驻留时间为 3 s。



(a)步长 10 nm

(a) Step size of 10 nm



(b)步长 5 nm

(b) Step size of 5 nm

图 7 Z轴运动分辨率测试结果

Fig. 7 Test result of motion resolution in Z axis

从图 7 中分析可知,Z轴采用 1 nm 分辨率的反馈使得系统能够实现更小的运动分辨率。运动系统在步长为 10 nm 时台阶十分明显,相邻台阶之间也没有出现交叠的现象,因此可以认为该运动系统的运动分辨率优于 10 nm;而在 5 nm 的进给步长下,定位时振动量过大(平均约为 ± 5 nm),与阶跃量相当。对其信号进行频域分析,如图 8 所示,发现存在 24.5 Hz 的尖峰分量,而在开环状态下位置信号存在同样的频域峰值,可以判断 Z轴受到了外部振动的干扰,因此为了达到更

好的稳态误差,应该改善机床隔振,减小地基和环境振动对运动控制系统的干扰。

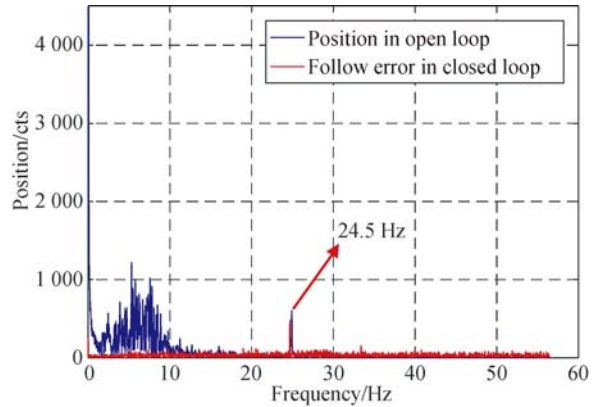


图 8 Z轴位置信号频域分析

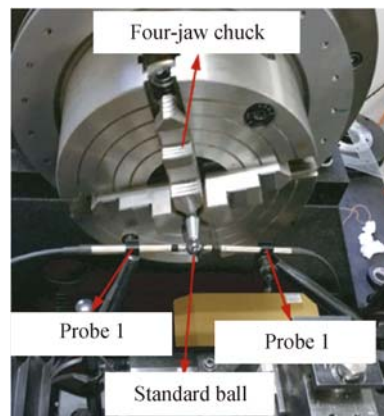
Fig. 8 Frequency domain analysis of Z-axis position signal

3 机床的几何运动误差与精度检测

在完成辊筒模具超精密机床控制系统集成与调试后,应进一步检测机床各轴的关键几何误差与定位精度,以此来预判机床的关键指标是否满足辊筒模具微结构的加工精度要求。

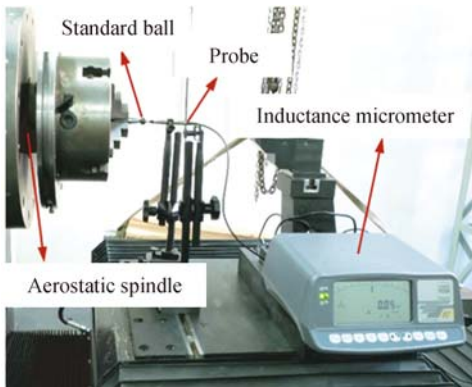
3.1 主轴回转精度检测

辊筒模具超精密加工机床采用气体静压主轴作为该机床的核心运动部件,气体静压主轴的回转精度是影响机床加工精度的主要因素,也是评价机床性能的一项重要指标。图 9 为主轴回转误差测量装置图。



(a)主轴径向跳动误差

(a) Spindle radial runout error



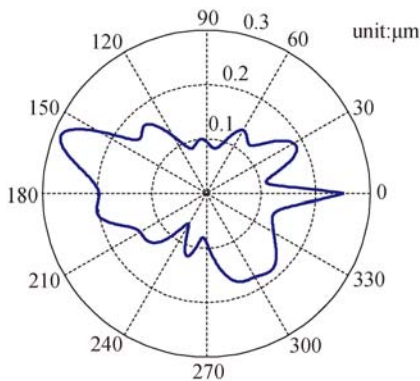
(b) 主轴轴向跳动误差

(b) Spindle axial runout error

图 9 主轴回转误差测量装置

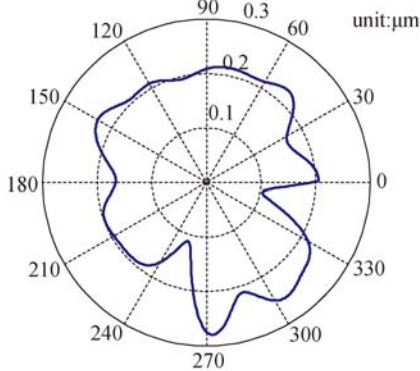
Fig. 9 Measurement setup of spindle rotation error

对原始测量数据进行误差分离,得到头架主轴和尾架主轴的径向跳动误差,如图 10 所示。其中,头架主轴的径向跳动误差为 $0.22 \mu\text{m}$,轴向跳动误差为 $0.18 \mu\text{m}$;尾架主轴的径向跳动误差为 $0.16 \mu\text{m}$,轴向跳动误差为 $0.05 \mu\text{m}$ 。可见,尾架主轴的回转误差要低于头架主轴的回转误差,这是因为头架主轴上安装了电机,电机的转子与定子间的磁拉力会影响主轴的回转精度。



(a) 头架主轴

(a) Headstock spindle



(b) 尾架主轴

(b) Tailstock spindle

图 10 主轴径向跳动误差

Fig. 10 Spindle radial runout error

3.2 直线运动轴直线度检测

直线运动轴的各项精度对辊筒模具超精密机床总体精度的影响是至关重要的。其中,导轨直线度误差是影响辊筒模具形状精度的重要因素之一。采用双轴自准直仪完成了导轨直线度的测量,如图 11 所示,在测量 Z 轴导轨直线度时,将自准直仪光管放置在床身上,反射镜安装在 Z 轴溜板上,反射镜随着 Z 轴溜板一起运动,测量行程为 1100 mm 。在未经过任何补偿的情况下,Z 轴导轨的直线度测量结果如图 12 所示,其中,俯仰直线度为 $1.99 \mu\text{m}$,侧摆直线度为 $1.06 \mu\text{m}$ 。采用相同的测量方法得到了 X 轴导轨直线度的测量结果,如图 13 所示,在 170 mm 的测量行程内,俯仰直线度为 $0.43 \mu\text{m}$,侧摆直线度为 $0.04 \mu\text{m}$ 。

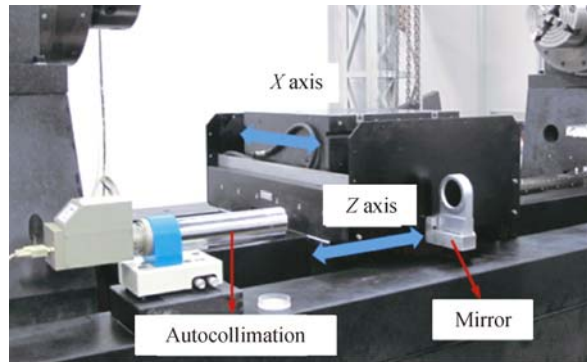
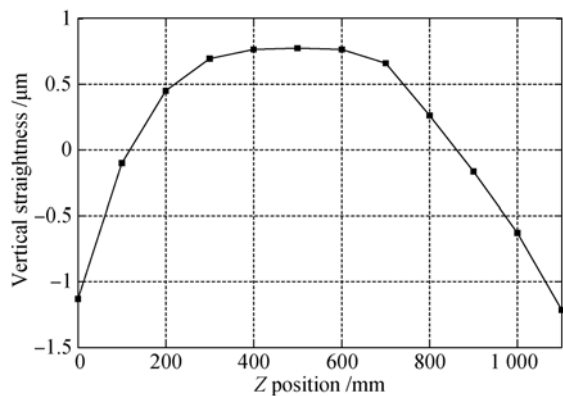


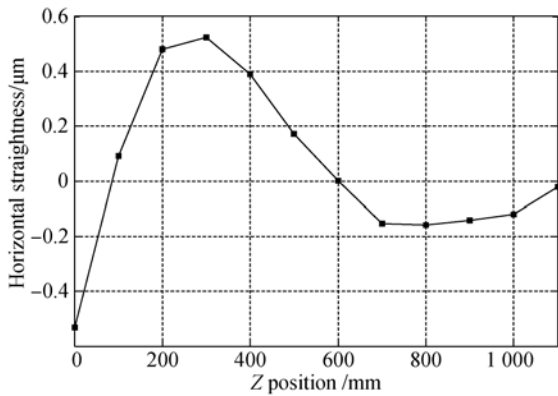
图 11 Z 轴导轨直线度测量装置

Fig. 11 Measurement setup of Z-axis slide straightness



(a) 俯仰直线度

(a) Vertical straightness

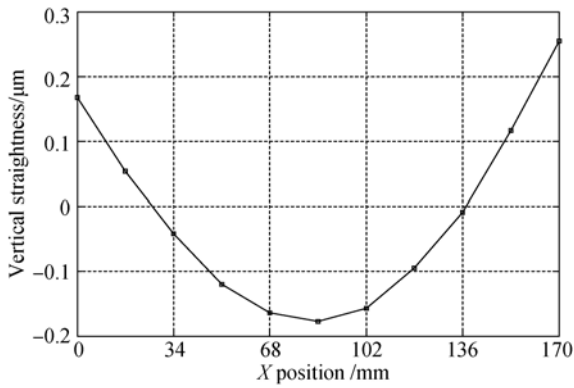


(b) 侧摆直线度

(b) Horizontal straightness

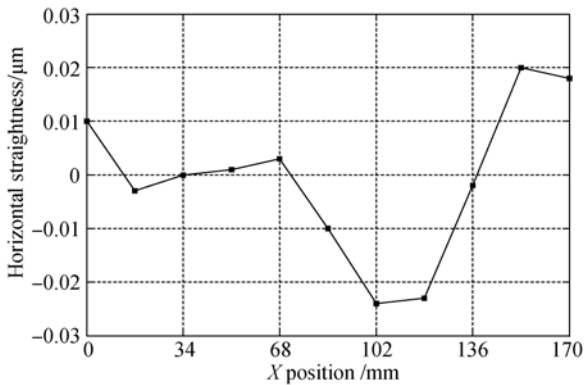
图 12 Z 轴导轨直线度测量结果

Fig. 12 Measurement results of Z-axis slide straightness



(a) 俯仰直线度

(a) Vertical straightness



(b) 侧摆直线度

(b) Horizontal straightness

图 13 X 轴导轨直线度测量结果

Fig. 13 Measurement results of X-axis slide straightness

3.3 运动控制系统定位精度补偿

辊筒模具超精密机床的主轴/C 轴具有精确的角度控制功能,这要求机床主轴具有较高的定位精度和重复定位精度,以满足微结构的加工要

求。如图 14 所示,采用英国 Renishaw 公司的 XL-80 激光干涉仪对机床的定位精度进行测量。

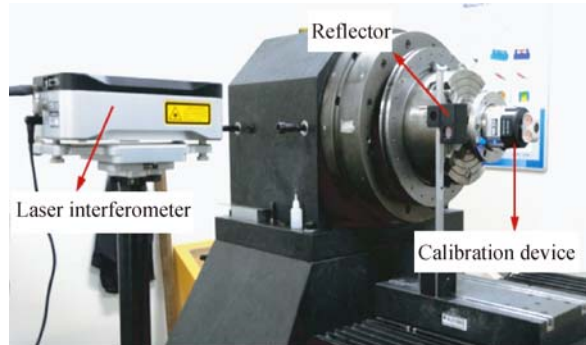


图 14 主轴/C 轴定位精度测量装置

Fig. 14 Measurement setup of C-axis positioning accuracy

图 15 为 C 轴定位精度和重复定位精度的测量结果,其中,主轴/C 轴的双向定位精度为 $7.42''$,双向重复定位精度为 $4.52''$ 。

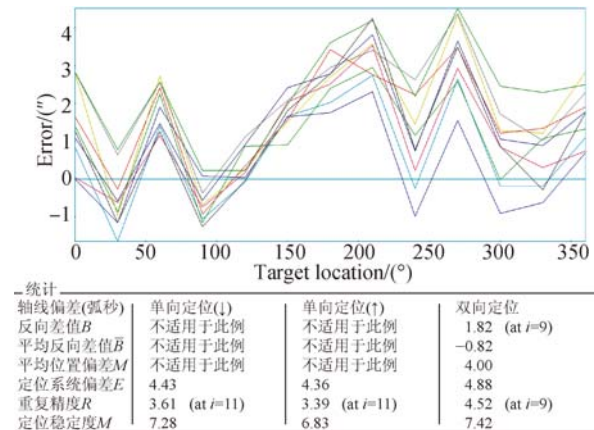


图 15 C 轴定位精度和重复定位精度的测量结果

Fig. 15 Positioning accuracy and repetitive positioning accuracy of C-axis

当微结构特征尺寸较大时,为了保证表面质量和加工精度,由于切削力过大,不能一次性完成加工,此时应当采用多步切削方法加工微结构阵列,但多步切削要求每一步的切削轨迹重合,这就对直线轴的定位精度和重复定位精度提出了很高的要求。图 16 所示为 Z 轴定位精度测量装置,经过检测及多次补偿后,在 1 100 mm 的测量行程内,Z 轴的双向定位精度为 $0.95 \mu\text{m}$,双向重复定位精度为 $0.88 \mu\text{m}$,检测结果如图 17 所示。采用相同的测量方法,得到在 200 mm 的测量行程内 X 轴的双向定位精度为 $0.73 \mu\text{m}$,双向重复定位精度为 $0.63 \mu\text{m}$ 。

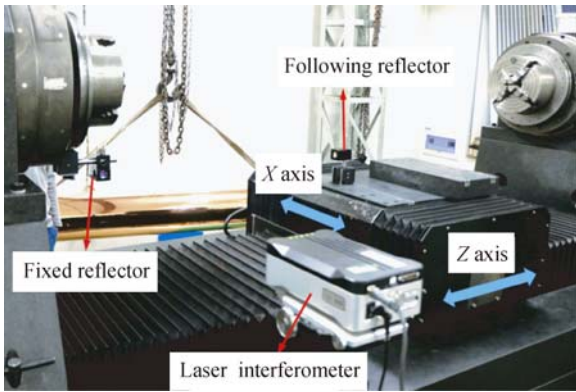


图 16 Z轴定位精度测量装置

Fig. 16 Measurement setup of Z axis positioning accuracy

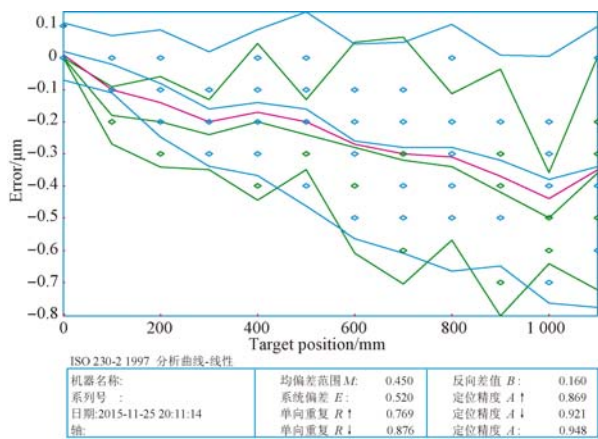


图 17 Z轴定位精度和重复定位精度的测量结果

Fig. 17 Positioning accuracy and repetitive positioning accuracy of Z axis

通过对机床各个轴系关键几何误差的检测以及对运动控制系统的定位精度检测与补偿,机床主轴回转精度、直线轴直线度以及定位精度均满足辊筒模具微结构阵列的加工精度要求。

4 V型槽阵列加工实验研究

V型槽阵列切削工艺对于微结构成型加工(三面体金字塔、四面体金字塔、微棱镜等成型加工)具有借鉴意义。本文首先以降低毛刺高度和改善表面质量为目标探索了V型槽阵列的切削工艺,并依此工艺参数在辊筒模具上加工了V型槽阵列,再由 Roll-to-Roll UV 固化方法将V型槽阵列转印到PET膜片,通过V型槽加工的节距误差和表面粗糙度来分析机床所具备的加工能力。

4.1 多步切削法

在V型槽切削时,材料在刀具刃口作用下发生弹性和塑性变形达到屈服极限后,材料剪切脱落,形成切屑;而V型槽边缘处在应力的作用下发生侧向流变形成毛刺而不是形成正常切屑,材料变化以弹塑性变形为主^[13];按出现位置,毛刺可分为切入毛刺、切出毛刺、侧向毛刺及倾斜毛刺4类^[14]。单点金刚石刀具切削V型槽结构时,主要以侧向流变,即侧向毛刺为主,毛刺高度与切削深度成正相关^[13]。因此通过采用多步切削法,改变单次加工的切削深度,可降低侧向毛刺高度和改善表面质量。图18所示为多步切削法原理,黑色区域为每一步切削时未变形的切削厚度。每一步切削为螺旋切削,切削深度逐步减小,最终获得设计尺寸的V型槽阵列。表2为V型槽切削系统的关键参数。

多步切削法需要机床各运动轴联动加工,并要求每一步的加工轨迹有很好的重复性,因此通过多步切削法加工V型槽阵列可以间接验证机床的定位精度、重复定位精度以及速度平稳性等性能。

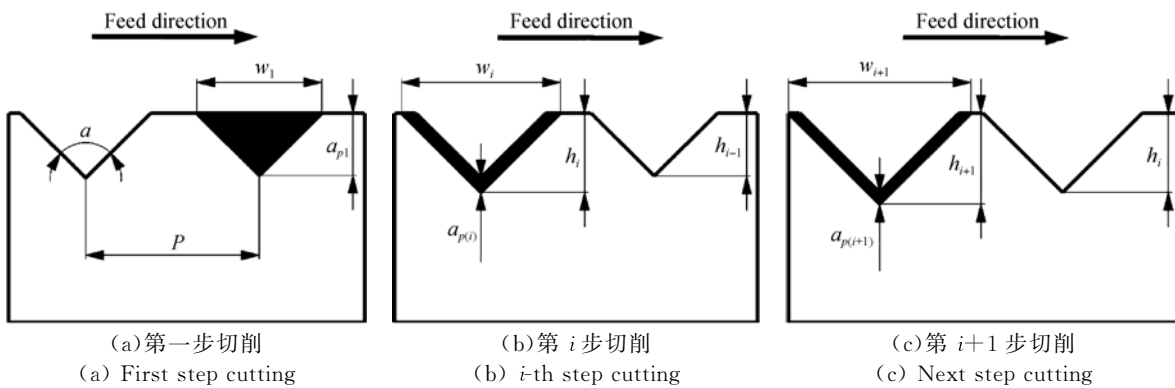


图 18 微棱镜的多步切削法原理图

Fig. 18 Method for multi-step cutting of micro-prism array

图 18 中, P 为微棱镜节距, α 为刀具尖角角度, w_1, w_i, w_{i+1} 分别为第一步、第 i 步、第 $i+1$ 步的 V 槽宽度, h_{i-1}, h_i, h_{i+1} 分别对应每步切削后的 V 槽深度, $a_{p1}, a_{pi}, a_{p(i+1)}$ 分别为第一步、第 i 步、第 $i+1$ 步的切削深度。

表 2 切削系统的关键参数

Tab.2 Key specifications of cutting system

选项	指标
镀层材料	电镀铜 (HV200-230)
主轴转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	300
金刚石刀具	包角(90°)
	前角(0°)
	后角(7°)

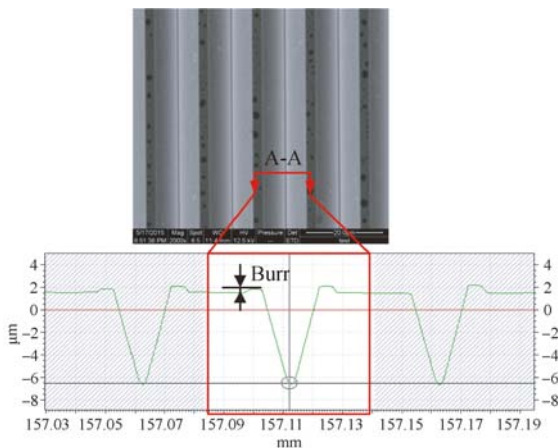


图 19 毛刺高度的测量结果

Fig.19 Measurement result of burr height

综上所述,多步切削法最后一步的切削深度对毛刺的影响非常关键,因此本文进行了切削实验,来优化最后一步的切削深度。通过 Taylor Hobson 轮廓仪测量 V 槽阵列平面模具,将轮廓数据导入数值软件中进行计算,取多组 V 槽求均值作为毛刺高度,毛刺高度定义如图 19 所示,切削实验参数与检测结果如表 3 所示。由检测结果可知,第二步切深对降低毛刺高度的效果最明显,并建议最后一步的切削深度在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。

表 3 多步切削法采用不同切削深度时的毛刺高度

Tab.3 Burr height of micro V-grooves with multi-step cutting process

第一步切深/ μm	第二步切深/ μm	毛刺高度/ nm
2	1	8.0
2	2	10.0
3	1	9.7
3	2	15.8
3	3	16.3
5	1	12.9
5	2	16.2
5	3	16.9
5	5	17.3
10	1	14.2
10	2	16.7
10	3	16.5
10	5	18.0

4.2 辊筒模具 V 槽阵列节距与表面粗糙度检测

根据上述实验得出的优化工艺参数,采用两步切削法,分别采用 $18 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 作为第一与第二步的切削深度,在平板模具上加工了连续的 V 槽阵列,图 20 所示为辊筒模具超精密机床切削 V 型槽阵列实验装置。将平板模具工件表面的 V 槽阵列通过 UV 照射固化在 PET 光刻胶上形成 V 槽膜片,图 21 分别为工件表面与 PET 表面 V 槽阵列的 SEM 检测图片,两者都没有明显的毛刺和缺陷,V 槽节距具有很好的一致性。因此,多步切削法最后一步的切削深度选为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,能够很好地提高 V 槽的加工质量。

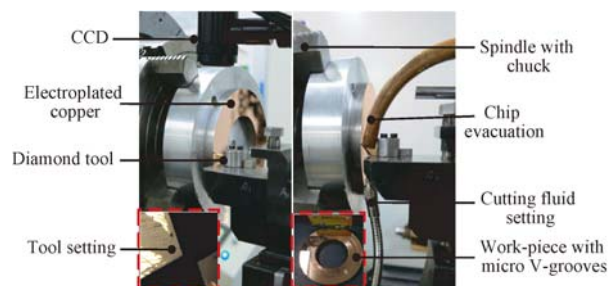


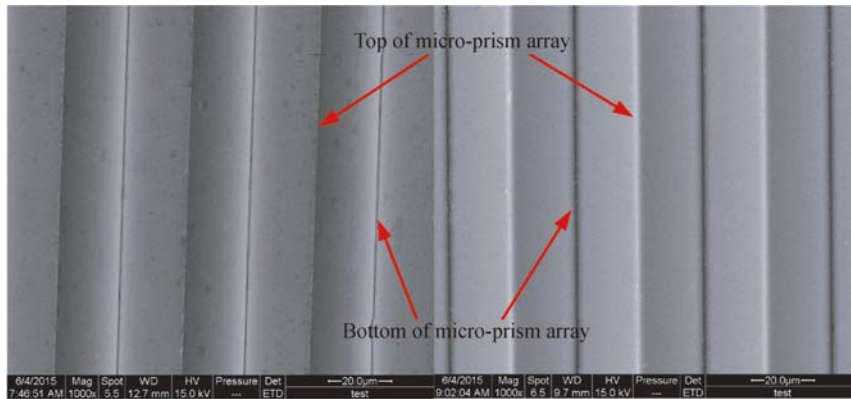
图 20 V 型槽阵列切削实验装置

Fig.20 Experimental setup for V-shaped groove array cutting

如图 22 所示,采用相同的切削参数,在辊筒模具上加工了宽幅为 600 mm、节距为 40 μm 的 V 型槽阵列,再由 Roll-to-Roll UV 固化工艺将模具上的 V 型槽阵列转印到 PET 膜片,使用 Taylor Hobson 轮廓仪检测膜片表面上 V 型槽的节距和表面粗糙度。其中,节距检测是取 N (一般取值 10~20)条 V 型槽节距(P)总和,求取平均值作为 V 型槽节距值,在膜片任一母线方向,均匀取 10 片样品。经检测,节距误差在 0.05~0.08 μm ,

均小于 0.1 μm ,其节距误差波动在 0.03 μm 以内;分析 V 型槽单边轮廓数据获得表面粗糙度,多次取样分析 R_a 均在 10 nm 以内。

V 型槽阵列的节距误差、误差波动范围及表面粗糙度的检测结果说明了辊筒模具超精密机床经过装配与调试后,其导轨直线度、各轴的定位精度与重复定位精度、低速平稳性等能够满足 V 型槽阵列对机床的要求,具备了在大尺寸辊筒模具表面加工高精度微结构的能力。



(a) 平板模具表面 V 槽 (b) PET 膜片表面 V 槽

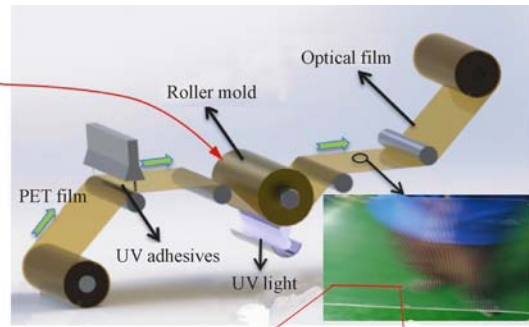
(a) Micro-prism array machined on flat work-piece (b) Micro-prism array imprinted on PET film

图 21 节距为 40 μm 的 V 槽阵列 SEM 照片

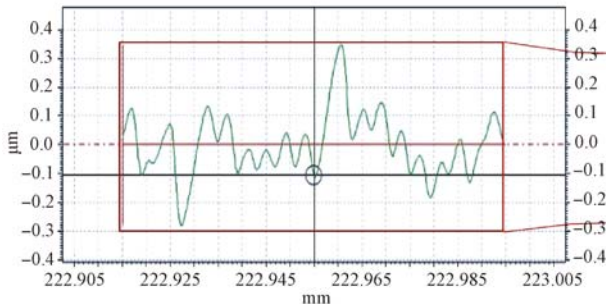
Fig. 21 SEM images of micro-prism array with pitch of 40 μm



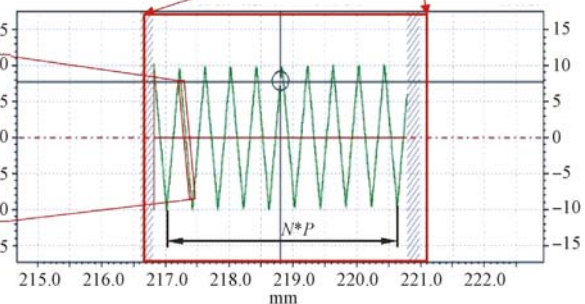
(a) 辊筒模具超精密机床 (a) Drum roll lathe



(b) 辊对辊UV转印方法 (b) Roll-to-roll UV cure process



(c) 粗糙度检测 (c) Measurement of surface roughness



(d) 节距测量 (d) Measurement of pitch

图 22 节距与粗糙度的检测结果

Fig. 22 Measurement results of pitch and surface roughness for micro-prism array with pitch of 40 μm

5 结论

本文详细阐述了光学微结构辊筒模具超精密机床在机械系统及运动控制系统的设计思路;完成了机床系统的集成与调试,并对关键的几何误差和定位精度进行了检测与补偿。结果显示,主轴径向跳动均在 250 nm 以内,Z 轴的定位精度为 990 nm/1 100 mm;满足微结构阵列加工对机床的精度要求。

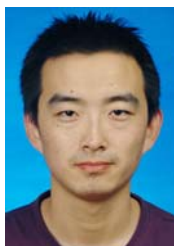
为了减小 V 槽阵列的切削毛刺,本文采用多

步切削法进行了多组 V 槽阵列切削实验,结果表明,多步切削工艺中最后一步切削深度应控制在 1~2 μm ,此时毛刺高度和表面质量均能满足光学模具的质量要求。利用多步切削法在宽幅为 600 mm 的辊筒模具表面上加工了 V 型槽阵列,并利用该模具进行了光学膜片 UV 转印实验,获得了节距误差小于 0.1 μm 、表面粗糙度 R_a 在 10 nm 以内的光学微结构膜片。实验结果表明,辊筒模具超精密加工机床具备了加工合格光学微结构辊筒模具的能力。

参考文献:

- [1] 孟繁斐,步敬. 集成成像系统中高填充率微透镜阵列的设计与加工[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2130-2138.
MENG F F, BU J. Design and fabrication for micro-lens array with high fill factor in integral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2130-2138. (in Chinese)
- [2] 董晓彬,周天丰,庞思勤,等. 玻璃模压成形用微沟槽磷化镍模具的超精密切削加工[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2986-2993.
DONG X B, ZHOU T F, PANG S Q, *et al.*. Ultra-precision microgroove machining of nickel phosphorous plating mold for glass molding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 2986-2993. (in Chinese)
- [3] WANG Y J, OUYANG S H, CHAO W C, *et al.*. High directional backlight using an integrated light guide plate [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1567-1575.
- [4] LANGUY F, HABRAKEN S. Performance comparison of four kinds of flat nonimaging Fresnel lenses made of polycarbonates and polymethyl methacrylate for concentrated photovoltaics [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2743-2745.
- [5] KUMAR V, SHRIVASTAVA R L, UNTAWALE S P. Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 376-390.
- [6] AHN S, CHOI M, BAE H, *et al.*. Design and fabrication of micro optical film by ultraviolet roll imprinting [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(8S): 5478.
- [7] CHANG C Y, TSAI M H. Development of a continuous roll-to-roll processing system for mass production of plastic optical film [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(12): 125014.
- [8] JASINEVICIUS R, DUDUCH J, CIRINO G, *et al.*. Diamond turning of small Fresnel lens array in single crystal InSb [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(5): 055025.
- [9] LI L. Fabrication of diffractive optics by use of slow tool servo diamond turning process [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(11): 113401.
- [10] WANG M W, TSENG C C. Analysis and fabrication of a prism film with roll-to-roll fabrication process [J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4718-4725.
- [11] OH J S, SONG C K, HWANG J, *et al.*. An ultra-precision lathe for large-area micro-structured roll molds [J]. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2013, 30(12): 1303-1312.
- [12] Nanotech HDL2000 / HDL2000-HD Specification Overview [R]. Swazey: Moore Nanotechnology Systems, 2010.
- [13] DENKENA B, DE LEON L, KÄSTNER J. *Burr Formation in Microstructuring Processes* [M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2010: 55-62.
- [14] 陈玉龙. 飞刀切削加工中毛刺的形成过程仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 11-27.
CHEN Y L. *Modeling and Experimental Study on Burr Formation Process in Fly-cutting* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 11-27. (in Chinese)

作者简介:



乔政(1989—),男,山东潍坊人,博士研究生,2013年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事超精密机床设计与运动控制以及超精密切削工艺方面的研究。E-mail: qiaozhengyunlong@126.com

导师简介:



王波(1971—),男,山东泰安人,博士,教授,博士生导师,1999年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事超精密机床、微细超精密加工技术、大气等离子体化学加工技术等方面的研究。E-mail: bradywang@hit.edu.cn