

文章编号 1004-924X(2019)01-0146-10

辊筒模具微透镜阵列的慢刀伺服成形加工

乔 政, 吴言功, 刘玉涛, 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:为实现辊筒模具大面积微透镜阵列的高效率与高精度加工,对微透镜阵列成形法的加工轨迹优化和进给轴伺服参数的优化方法进行了理论分析与实验研究。首先,通过分析微透镜阵列的特征轮廓,确定微透镜表面振纹的主要诱因为过渡台阶的突变;其次,为使加工轨迹的二阶导数具有连续性,提出采用三次样条插值与傅里叶级数拟合对加工轨迹进行分段优化设计;最后,在优化加工轨迹的基础上,通过调整伺服系统的前馈参数,改善了进给轴的响应能力,减小了因驱动质量和阻尼而产生的跟踪误差。口径为 800 μm 、深度为 26.7 μm 的微透镜阵列的加工实验表明:采用优化的刀具轨迹和伺服参数,微透镜加工效率可以达到 8 Hz,进给轴跟踪误差小于 300 nm,并消除了微透镜阵列的表面振纹。微透镜单元口径尺寸精度为设计值的 1.075%,随机检测 50 组,口径尺寸变化范围控制在 2 μm 内,表明微透镜具有良好的尺寸一致性。实验结果表明,加工轨迹的分段设计方法和伺服参数优化可有效抑制进给轴的振动,改善了微透镜阵列表面质量。

关键词:微透镜;轨迹优化;慢刀伺服;辊筒模具;超精密加工

中图分类号: TG502 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192701.0146

Fabrication of micro-lens array in large-size drum roller by slow tool servo diamond forming turning

QIAO Zheng, WU Yan-gong, LIU Yu-tao, 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 realize the high-efficiency and high-precision fabrication of micro-lens array in a large-sized drum lathe, a study on tool path fitting and servo parameter optimization for micro-lens machining with slow tool servo was presented theoretically and experimentally in this paper. The original trajectory characteristics of the micro-lens array were analyzed first, and the chatter marks on the micro-lens surface were caused by sharp points at the original machining trajectory. Secondly, a method was proposed to fit the machining trajectory of the transition section using cubic spline interpolation and Fourier series fitting in order to ensure the trajectory's continuity of the second derivative. Finally, the capability of dynamic response was improved by adjusting the servo parameters, so that the follow error (FE) of the feed axis caused by the inertia and damping effect was reduced with the optimization of machining trajectory. Machining experiments on micro-lens with diameter of 800 μm and

收稿日期:2018-05-24;修订日期:2018-07-06.

基金项目:粤港关键领域重点突破项目资助(No. 2004A10403021);广东省攻关项目资助(No. 2006A10401006)

depth of $26.7\ \mu\text{m}$ were carried out. The results show that the homemade ultra-precision machine can fabricate eight micro-lenses per second with $300\ \text{nm}$ FE, and the chatter marks of the micro-lens surface caused by sharp points are eliminated. The diameter error of micro-lens is 1.075% of the designed value. The fitting method has a good effect on the surface quality of micro-lens array.

Key words: micro-lens; trajectory optimization; slow tool servo; roller mold; ultra-precision machining

1 引言

光学微透镜阵列因其特殊的几何特征而具有多种光学功能,其作为新一代的光学元件在诸如光学信息处理、光准直系统、均匀照度显示、三维成像系统等诸多领域里得到了广泛应用^[1-4]。例如,微透镜阵列作为 Hartmann-Shack 波前传感器中的核心部件可用来获取光斑并对其进行光学性能分析^[5]。微透镜阵列可用于仿生复眼结构以获取更宽视场,并具有高灵敏度、高分辨率的特性,适用于大范围、高速轨迹跟踪与监测等应用^[6]。为了满足微透镜阵列的应用需求,许多学者对微透镜高效率、高精度的加工方法开展了深入研究。目前常见的加工方法有激光直写技术、光敏玻璃热成型法、影印技术、熔融光刻胶技术、聚焦离子束刻蚀技术及微流体成型法等^[2,7]。虽然通过以上方法均能实现微透镜阵列的加工,但上述方法工艺复杂、成本高,并对加工材料有特殊要求。为了满足大面积微透镜阵列的低成本、高效率且高精度的制造需求,辊对辊(Roll-to-Roll)超精密复制加工技术被看作是一种理想的工艺方法^[8]。其优势在于利用 UV 固化技术可将辊筒模具表面的微结构连续、不间断地转印到 PET 膜片上,形成高品质光学膜^[9-10]。而 Roll-to-Roll 工艺的最核心技术是辊筒模具表面上微透镜阵列的加工。

金刚石铣削、金刚石磨削以及金刚石飞切技术均可以获得高精度微透镜阵列模具^[11],但这些技术分别存在加工效率低、刀具磨损快及成本高等劣势。许多学者采用慢刀伺服或快刀伺服技术实现了对微透镜阵列模具的超精密加工^[12],但其研究内容主要集中在平面微透镜阵列的加工,而很少对辊筒表面微透镜阵列加工进行研究。并且,其研究大多采用了轨迹法加工微透镜阵列^[13-14],这使得加工时间成倍延长,不利于辊筒模

具上大面积微透镜阵列的高效加工。另外,多位学者对微透镜阵列表面振纹的影响因素进行了分析^[5-7,11],认为微透镜沿切削方向的表面振纹主要受刀具振动的影响,金刚石刀具与工件间的相对振动会导致飞刀、慢刀及快刀伺服工艺在微透镜表面产生振纹。微透镜阵列原始轨迹具有突变特征,若将微透镜阵列原始特征轨迹作为加工路径,首先会使得机床伺服系统执行该指令时产生振荡的跟踪误差;其次在电机力与切削力的周期性冲击作用下,可能激发机床共振。这都会导致刀具发生振动,在微透镜表面产生振纹。为了减小振动对微透镜表面质量的影响,目前学者提出了两种可能的解决方案:将加工指令拟合为平滑过渡的加工轨迹,减小加工指令突变对机床的冲击^[7];通过提高进给轴伺服系统带宽,扩大对指令频谱的覆盖域,提高伺服系统响应能力,减小伺服系统的振动幅值^[11]。

综上所述,国内外学者从加工方法、加工精度以及表面形貌等方面进行了大量地研究,但很少对微透镜阵列的成形法加工进行分析。并且,加工轨迹优化多侧重于保持加工速度的连续性,并未考虑运动加速度的连续性以及进给轴伺服参数对加工质量的影响。因此,为了实现在辊筒模具上高效率、高精度的微透镜阵列加工,本文首先对微透镜阵列的表面振纹进行了分析。其次,提出了一种加工轨迹的拟合方法,并对伺服参数进行了优化;最后通过切削实验验证了该轨迹拟合方法对抑制振纹的有效性。

2 微透镜阵列慢刀伺服成形加工

图1为自主研制辊筒模具超精密机床加工微透镜阵列的示意图。该超精密机床具有 X-Z-B-C 四轴联动能力:其中 X、Z 轴为直线运动轴,B 轴为角位移闭环控制的回转轴,用以实现刀具角度偏摆,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。考虑到辊筒模具尺寸和质量较大,C轴独立安装在床身上。X、Z轴采用十字滑块式布局,即 X轴位于 Z轴工作台上,且两轴的运动轴线相互垂直。直线轴均采用大推力直线电机直驱液体静压导轨配合高精度光栅反馈来实现位置闭环,因此直线轴具有很好的加速和响应能力,这有利于提高慢刀伺服加工的加工精度和效率。在微透镜阵列的加工过程中,C轴为角位移闭环模式,驱动辊筒模具以恒速转动;X轴带动刀具往复进给运动,与 C轴联动完成微透镜阵列的加工;Z轴移动保证微透镜阵列的横向节距精度。

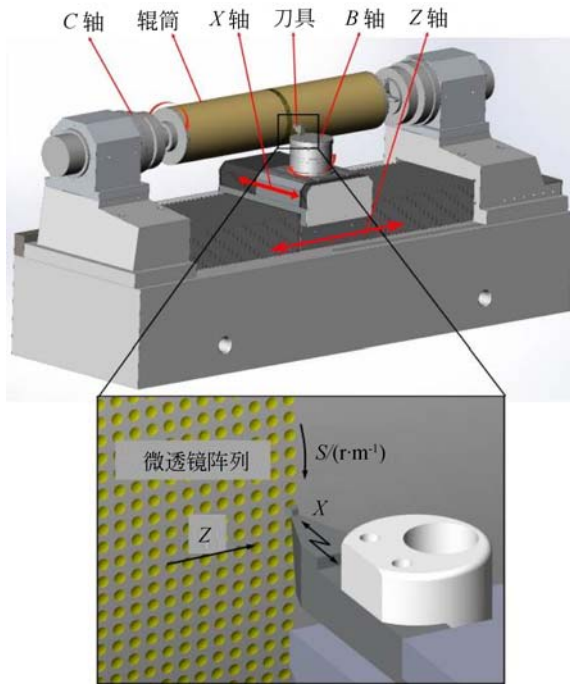


图 1 辊筒模具超精密机床加工微透镜阵列

Fig. 1 Layout of drum roll lathe and schematic of processing micro-lens array

图 2 为加工的微透镜阵列在超景深显微镜下的图像。在边缘处,由于光线照射倾斜,发现微透镜左侧存在切削方向的划痕,这是由于经过长时间加工后,金刚石刀具经受切削力冲击,刀刃破损后划伤了表面。由图 2 局部放大图像可见,微透镜表面在刀具切入侧有明显的纹路,该纹路垂直于切削方向,而平行于刀具的切削刃,并具有重复性,存在于每个微透镜单元表面,降低了微透镜阵列的表面质量。

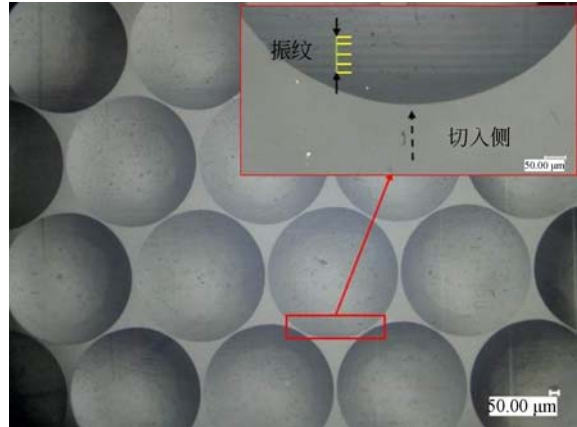


图 2 微透镜阵列表面纹理

Fig. 2 Surface defects of micro-lens array

通过上述分析可知,微透镜表面纹路与加工时刀具状态有关。图 3 为成形法加工微透镜阵列的刀具运动轨迹示意图。图中 D 为微透镜口径, R 为刀具半径和微透镜球径, w 为微透镜阵列的台阶宽度(过渡阶段)。微透镜单元的横向轮廓取决于金刚石刀具的切削刃,纵向轮廓由刀具运动轨迹与 C轴联动加工形成,因此金刚石刀具的一次切削即可完成微透镜单元的加工。相较于轨迹法加工,成形法加工效率高,并且微透镜表面没有多次切削刀具的走刀痕迹,因此微透镜横向表面质量要高于轨迹法加工表面。

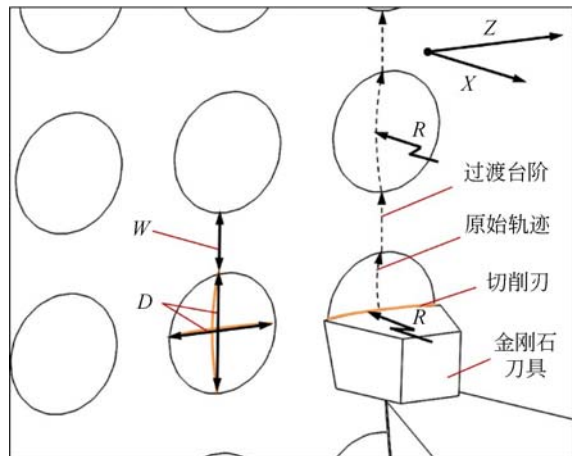


图 3 成形法加工微透镜阵列的刀具运动轨迹

Fig. 3 Tool path of micro-lens forming process

以 C轴零点对应的加工起点为原点,以工件圆周方向的周长为横坐标(与时间呈正比例关系),以切削深度沿切削方向的变化为纵坐标,绘

制刀具轨迹如图 4 所示。刀具的切削深度在微透镜口径内是连续变化的,但在与台阶衔接处出现尖点,这种微透镜原始轨迹与相关文献所述相同^[5-7,11]。当进给轴执行该指令时,会由于台阶两端的尖点而产生较大跟踪误差,使得刀具在微透镜的切入侧和切出侧产生振动,进而在工件表面留下振动纹路。

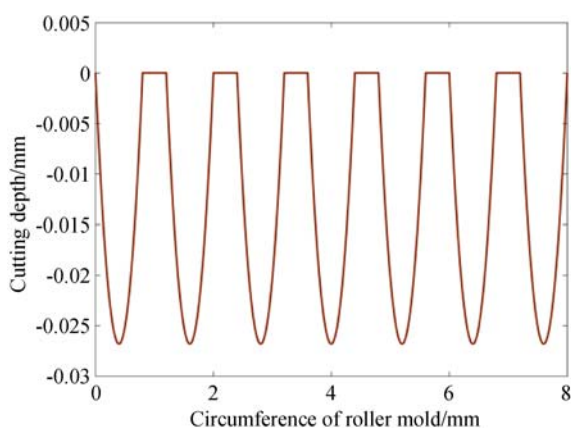


图 4 切削深度在切削方向的变化曲线

Fig. 4 Curve of cut depth along cutting direction

如图 5 所示为微透镜加工时进给轴(X轴)指令、实际位置以及跟踪误差随时间变化的示意图(彩图见期刊电子版)。由图 5 可知,刀具经过轨迹上台阶两端的尖点时均会产生振动。为了避免刀具切出时加工到台阶表面,对原始轨迹进行延拓使轨迹过渡的台阶远离工件表面,避免刀具切出台阶后的振动刮伤工件表面。但是切入侧的振

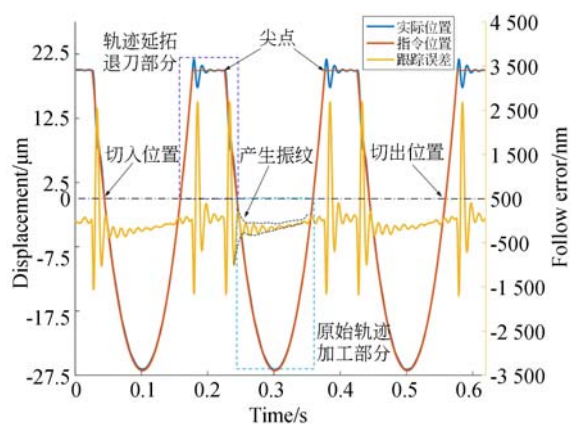


图 5 进给轴的指令与实际位置对比

Fig. 5 Comparison between command and actual position

动依然存在,从图 5 可以看出,进给轴切入位置的跟踪误差较大,切入后跟踪误差迅速衰减。如图 6 所示为微透镜阵列车削表面振纹,刀具振动在微透镜切入侧留下了明显振纹,与进给轴(X轴)的跟踪误差曲线相吻合,表面波动的丰谷值大约有几百纳米,波长几十 μm ,属于中频误差范围。而在微透镜切出侧,由于此时刀具跟踪误差很小,没有出现振纹。

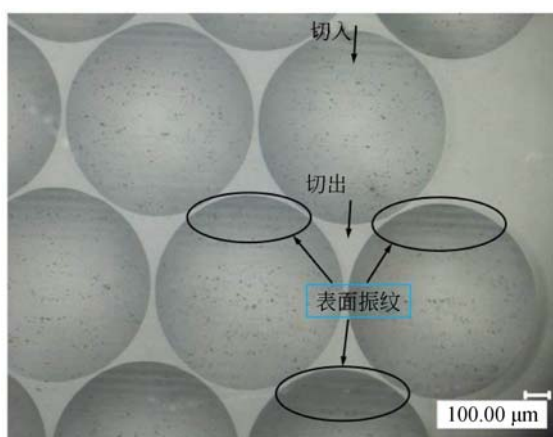


图 6 微透镜阵列车削表面振纹

Fig. 6 Chatter marker of micro-lens array surface

3 微透镜阵列加工轨迹优化

通过对轨迹的分析和实验验证,微透镜表面振纹产生的主要原因是加工轨迹尖点处一阶导数不连续、不平滑。对图 5 中的指令位置求一阶导数,如图 7 所示(彩图见期刊电子版),在加工轨迹

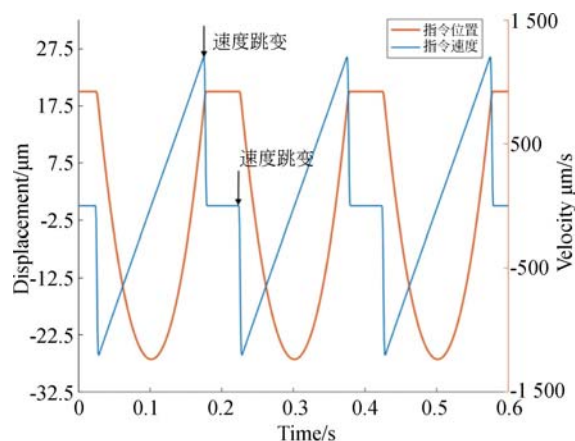


图 7 原始轨迹的速度分析

Fig. 7 Speed command analysis of tool trajectory

台阶两端尖点处,进给轴的速度指令发生了跳变导致伺服系统出现振荡,进而使刀具振动并在微透镜表面产生了振纹。因此,将加工轨迹的台阶进行平滑过渡,消除速度指令跳变,将减小进给轴伺服系统的振荡,从而消除微透镜表面振纹,提高加工质量和加工效率。

基于以上分析,分别采用三次样条插值方法和傅里叶级数拟合方法将加工轨迹平滑过渡:首先,规划微透镜阵列的切削顺序,保证在切削方向上相邻微透镜单元台阶宽度不小于微透镜口径的一半($w \geq D/2$)。其次,延拓原始轨迹,设定过渡台阶与工件表面的距离。最后,将加工轨迹平滑过渡。优化后轨迹要保证尖点处速度连续可导且过渡平滑,并且要求拟合后加工轨迹与微透镜轮廓没有误差。

三次样条插值能够保证插值函数经过所有原始轨迹的离散点,因此其插值点与微透镜轮廓之间不会产生误差。如图 8 所示(彩图见期刊电子版),为三次样条插值原始轨迹。虽然速度曲线连续,但在过渡台阶两端的衔接点处(尖点处),加速度曲线并不连续,存在跳变,因此再衔接点处伺服系统仍存在较大跟踪误差。

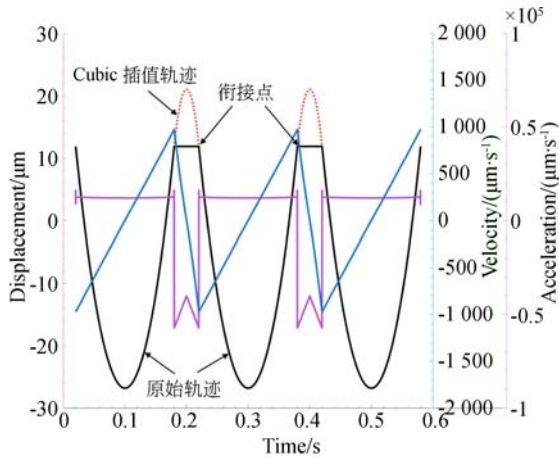


图 8 三次样条插值原始轨迹

Fig. 8 Cubic spline interpolation of tool path

与三次样条插值相比,高阶傅里叶级数拟合得到的位置曲线多阶可导,即速度、加速度以及加加速度(急动度)均是连续可导。但高阶傅里叶级数拟合采用最小二乘法将拟合函数收敛至原始轨迹,因此傅里叶级数拟合函数不能经过每一个原始轨迹的离散点,导致存在原理性拟合误差。如

图 9(彩图见期刊电子版)所示为 20 阶傅里叶级数拟合微透镜延拓轨迹,图中速度与加速度曲线在衔接处均是连续可导的,但微透镜加工部分轨迹存在拟合误差,残差曲线与拟合轨迹的加速度曲线相对应。另外,傅里叶级数拟合的阶数越高,拟合函数与原始轨迹的误差就越小,由于微透镜加工轨迹之间的台阶宽度有限,阶数越高,过渡部分轨迹加速度越大。为避免过大的加速度,经过实验验证采用 20 阶傅里叶级数拟合函数。傅里叶级数的拟合函数 $f(x)$ 表达式如式(1):

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx), \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx, (n = 0, 1, \dots, 20) \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx, (n = 1, 2, \dots, 20) \end{cases}$$

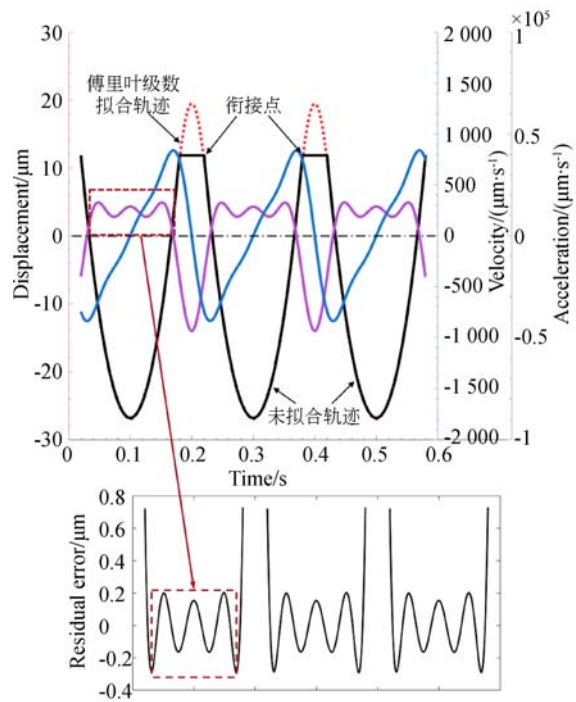


图 9 傅里叶级数拟合刀具轨迹及残差

Fig. 9 Fourier series fitting of tool path and residual error

根据上述两种方法的特点,本文提出一种新的微透镜加工轨迹拟合方法。如图 10 所示(彩图见期刊电子版)为三次样条插值与傅里叶级数拟

合轨迹拼接示意图。原始轨迹进行傅里叶级数拟合后,选择延拓段与拟合轨迹重合点中最靠近过渡台阶的离散点,在该离散点处对傅里叶级数拟合函数截断,并与三次样条插值的轨迹进行拼接,形成新的加工轨迹。该轨迹的微透镜轮廓部分由三次样条插值得到,过渡台阶部分由傅里叶级数拟拟合。使得加工轨迹既实现了微透镜加工部分轮廓无残差,又保证了衔接点处速度连续可导并且加速度连续。

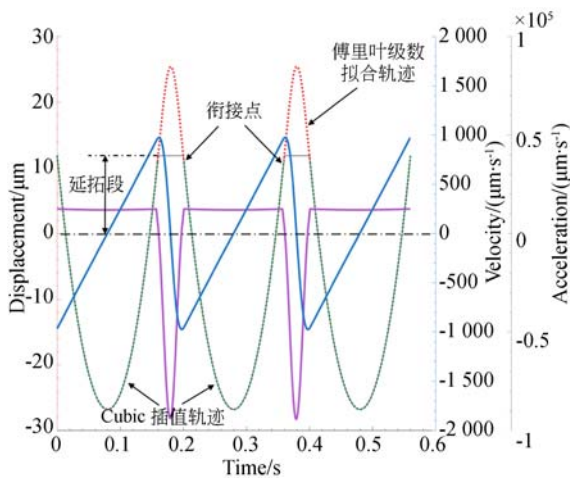


图 10 三次样条插值与傅里叶级数拟合轨迹拼接
Fig. 10 Tool path splice between cubic spline interpolation and Fourier series fitting

在完成微透镜加工轨迹优化之后,设定加工效率为 5 Hz,即每秒加工 5 个微透镜单元,对比原始轨迹与拟合后轨迹的频谱,如图 11 所示。原始轨迹的频谱在中高频部分的分量明显大于拟合

轨迹。这说明优化后的加工轨迹作为进给轴运动指令,会减小进给轴的跟踪误差,降低振动幅值,有助于提高微透镜表面质量。

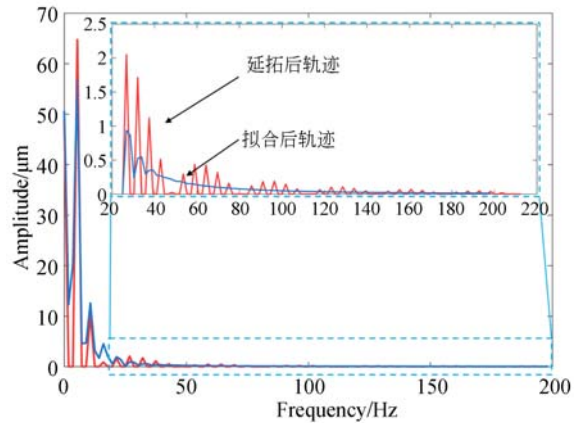


图 11 拟合后轨迹与原始轨迹的频谱对比
Fig. 11 FFT comparison of fitting and origin curve

4 伺服系统参数对跟踪误差的影响

辊筒模具超精密机床构建的伺服系统结构如图 12 所示。该伺服系统主要包括位置环和电流环,速度环虽然可以改善系统阻尼特性,提高控制系统稳定性,但会带来滞后效应,对于慢刀伺服加工微透镜阵列,伺服系统的快速响应能力更为重要。因此伺服系统选择了位置环与电流环,位置环由 UMAC 控制器来实现,实现高精度位置定位,电流环在驱动器中闭合,减小电流波动,保证力矩准确输出。

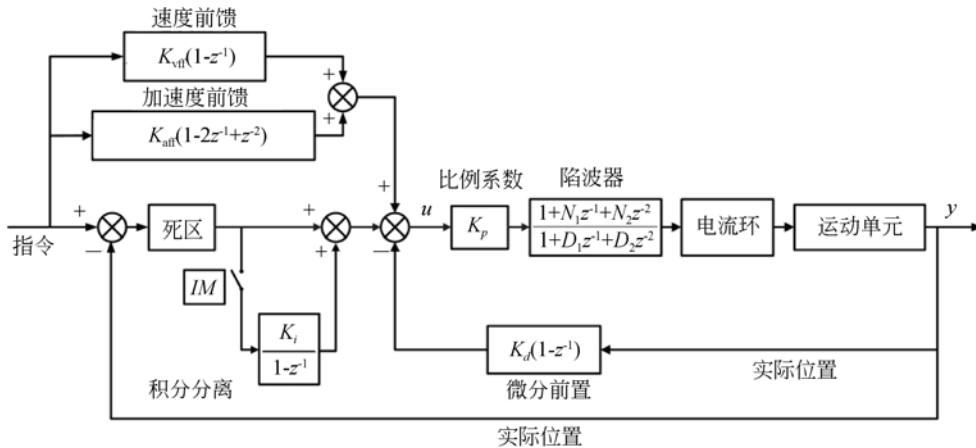


图 12 伺服控制系统结构
Fig. 12 Diagram of servo control system

该超精密机床采用 UMAC 运动控制器实现四轴联动控制,UMAC 运动控制器对传统 PID 算法进行了改进,提供了基于反馈校正和前馈补偿结合的 PID 伺服控制策略,主要包括:积分分离、微分先行、前馈补偿、陷波滤波等模块,其中前馈补偿主要是减小由于速度变化、系统惯性、摩擦等因素影响而带来的跟踪误差。前馈补偿直接对加工指令处理,与 PID 控制器同时输出到电流环。伺服系统前馈参数包括速度前馈 K_{vf} 与加速度前馈 K_{af} 。速度前馈是减小由微分环节 K_d 阻尼效应造成的系统延迟。加速度前馈是减小由于系统惯性引起过冲而产生的跟踪误差。

对于微透镜阵列的慢刀伺服加工而言,加工频率越高,进给轴速度越快,加速度也越大,引起的跟踪误差也越大,导致微透镜单元面型误差和表面质量下降。因此在不同的加工轨迹和加工频率下,要保证最小的进给轴跟踪误差,需要根据运动指令优化前馈参数,即速度前馈与加速度前馈。

如图 13 所示为速度前馈值对跟踪误差的影响。图中曲线 1~4 依次对应的 K_{vf} 值分别为:2 800、2 900、3 000、3 100,加工轨迹切入点对应跟踪误差随着速度前馈系数 K_{vf} 增大由负值增大为正值,而切出点跟踪误差由正值趋近于 0。实际位置先滞后于指令轨迹,并随着 K_{vf} 继续变大超前与指令轨迹,切入点与切出点之间加工段 FE_{max} 先从大变小,再变大,因此应选择 FE_{max} 最小时的 K_{vf} 值作为速度前馈系数。

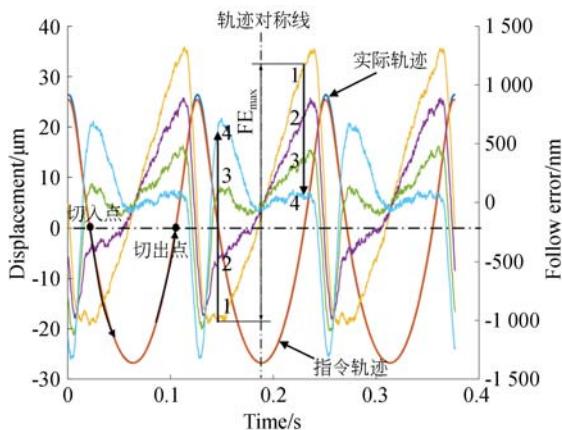


图 13 速度前馈系数对跟踪误差的影响

Fig. 13 Effect of K_{vf} on follow error

如图 14 所示为加速度前馈参数对跟踪误差的影响。图中曲线 1~5 依次对应的 K_{af} 值分别为:800、900、1 000、1 100、1 200,切入点处跟踪误差随着 K_{af} 增大而变大,而切出点 FE 由正值趋近于 0。各跟踪误差曲线相交于切入点后一点,是由于过渡段跟踪误差较大,在 PID 控制器作用下逐渐收敛的结果。随着 K_{af} 增大,加工段大部分区域跟踪误差曲线向下偏移,说明由惯量造成过冲误差不断减小,并逐渐变为负值,实际运动幅值从放大状态变为收缩状态。而切入点与切出点之间加工段 FE_{max} 先从大变小,再变大,因此应选择 FE_{max} 最小时的 K_{af} 值作为加速度前馈系数。

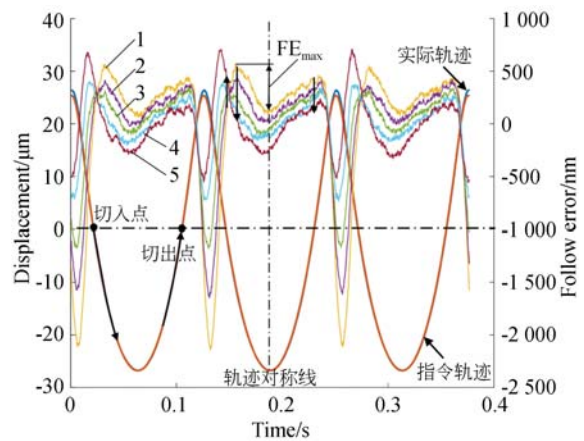


图 14 加速度前馈系数对跟踪误差的影响

Fig. 14 Effect of K_{af} on follow error

5 切削实验与结果

为了验证加工轨迹拟合方法,使用自主研发的辊筒模具超精密加工机床(DRL-2000)进行了微透镜阵列与复眼结构切削实验,机床关键参数如表 1 所示。微透镜阵列切削实验流程如图 15 所示。微透镜阵列在辊筒模具表面加工完成后,表面涂覆一层 UV 固化胶水,在紫外光源的照射下,微透镜阵列将转印到 PET 光学膜片上。本文通过超景深显微镜检测光学膜片来分析微透镜阵列加工质量。

表 1 辊筒模具超精密加工机床特性参数

Tab.1 Specifications of ultra-precision drum roll lathe

机床部件	特性	参数	
辊筒模具	最大尺寸(长×直径)	2 000 mm×500 mm	
主轴/C轴	分辨率	3.6''	
	最大速度	600 r/m	
	B轴	分辨率	0.14''
B轴	最大速度	60 r/m	
	X轴	行程	350 mm
	分辨率	5 nm	
X轴	最大速度	40 mm/s	
	Z轴	行程	2 100 mm
	分辨率	1 nm	
Z轴	最大速度	300 mm/s	

表 2 切削系统参数

Tab.2 Parameters of cutting system

切削系统	参数
金刚石刀具	前角 0°
	后角 10°
	圆弧半径 R3 mm
加工频率	8 Hz
工件材料	电镀铜(HV260-280)
切削液	无嗅溶剂油 Isopar-H

轴的振动,改善了微透镜表面质量。微透镜单元口径尺寸经测量为 791.60 μm,尺寸误差 8.6 μm,为设计值的 1.075%。这可能是成形法加工的切削力较大的缘故,切削力引起让刀现象,使刀具实际切削深度小于 26.7 μm,从而导致微透镜口径变小。对辊筒模具不同位置的微透镜口径尺寸随机检测 50 次,检测值均处于 791~793 μm 范围内,变化范围为 2 μm,说明微透镜阵列具有

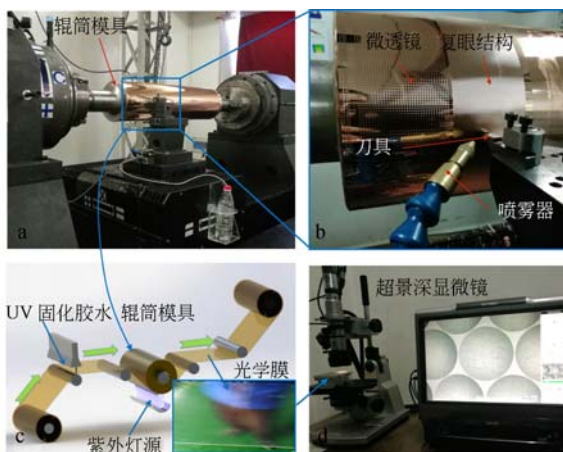


图 15 微透镜阵列切削实验流程

Fig.15 Flow of micro-lens array cutting experiments

5.1 微透镜阵列加工实验

微透镜阵列参数如下:微透镜单元为球径 (R)3 mm,口径(D)为 0.8 mm 的球冠面,切削方向与 Z 向的单元周期均为 1.2 mm,台阶宽度(w)为 0.4 mm,微透镜单元延拓后口径为 0.96 mm,傅里叶级数拟合函数选择 20 阶正余弦三角函数。切削系统参数如表 2 所示。

微透镜阵列检测图片如图 16 所示。通过检测光学膜片表面的微透镜阵列发现微透镜切入侧的刀具振纹已经消除,与原始轨迹延拓后的加工效果相比,可以看出三次样条插值与傅里叶级数拟合拼接法生成的加工轨迹有效减小了机床进给

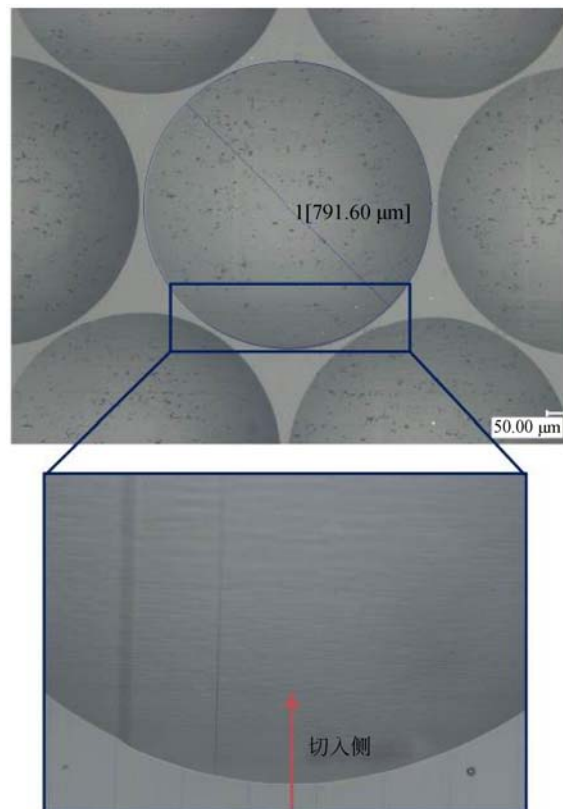


图 16 微透镜检测图片

Fig.16 Photograph of micro-lens array

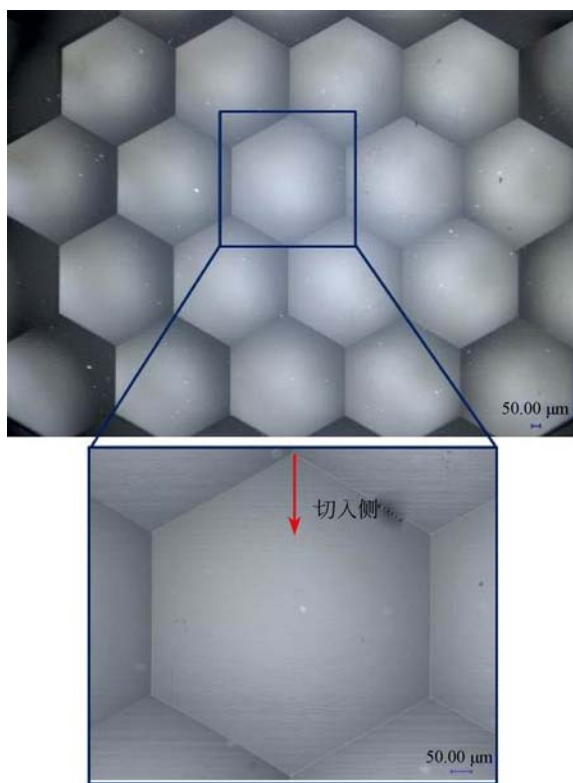


图 17 复眼结构检测图片

Fig. 17 Photograph of compound eye structure

良好的尺寸一致性。另外,微透镜切入侧与切出侧的形状对称,说明在切入和切出部分,进给轴跟踪误差相同,如图 13、图 14 所示,此时 FE_{\max} 误差最小。

5.2 复眼结构加工

在微透镜单元尺寸以及加工参数的基础上,保持辊筒模具周向的微透镜单元周期不变,将 Z

向间距改为 $0.867D$,并使加工起点沿周向移动半个节距周期的一半 $(D+\omega)/2$ 。显然,可以由 7 个相邻的微透镜单元相干涉得到等边六边形的复眼结构。加工频率 8 Hz,刀具参数与微透镜阵列所用刀具相同。图 17 所示为复眼结构的超景深显微镜检测图。从图中可以看出,通过慢刀伺服成形加工的复眼结构,边缘轮廓清晰,各结构单元均匀一致,没有出现中频误差振纹。

6 结 论

微透镜原始轨迹存在的尖点是引起微透镜表面振动纹理的主要原因。受限于机床的加速能力与动态性能,在轨迹尖点处,运动指令的速度和加速度突变使得进给轴产生了振动,从而带动刀具在微透镜表面上产生了振纹。采用三次样条插值和傅里叶级数拟合拼接方法,可以保证加工轨迹在尖点处二阶导数连续,并且在加工段没有拟合误差。对进给轴伺服参数进行优化调整,减小了加工时进给轴的跟踪误差,提高了加工频率,并保证了微透镜阵列的加工精度。

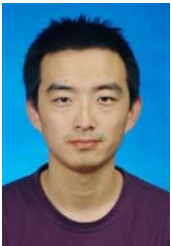
本文对微透镜阵列和复眼结构进行了切削实验,实验结果表明,慢刀伺服成形加工口径 800 μm 、深度 26.7 μm 的大尺寸微透镜阵列,可以实现 8 Hz 的加工效率,进给轴最大跟踪误差 FE_{\max} 小于 300 nm,同时消除了微透镜表面切入侧的中频误差振纹。经随机检测,微透镜单元口径尺寸误差约为设计值的 1.075%,尺寸波动范围为 2 μm ,表明微透镜阵列具有良好的一致性。

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] 朱晓阳,侯丽雅,郑悦,等. 微流体数字化技术制备聚合物微透镜阵列[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 360-368.
ZHU X Y, HOU L Y, ZH Y, *et al.*. Fabrication of polymer micro-lens array by micro-fluid digitali-
- [3] 邓欢,李述利,吴非,等. 增大 3D 观看视角的会聚式集成成像[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 1-6.
DENG H, LI SH L, WU F, *et al.*. Toed-in integral imaging with enhanced 3D viewing angle [J]. *Opt. Precision Eng*, 2014, 22(1): 1-6. (in Chinese)
- [4] 朱咸昌,伍凡,曹学东,等. 基于 Hartmann-Shack 波前检测原理的微透镜阵列焦距测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1122-1128.
ZHU X CH, WU F, CAO X D, *et al.*. Focal length measurement of microlens-array based on wavefront testing [J]. *Opt. Precision Eng*, 2013, 21(5): 1122-1128. (in Chinese)

- [5] LIU X, ZHANG X, FANG F, *et al.*. Influence of machining errors on form errors of microlens arrays in ultra-precision turning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 96(9): 80-93.
- [6] ZHANG X, FANG F, Yu L H, *et al.*. Slow slide servo turning of compound eye lens[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 023401.
- [7] 张效栋, 王志诚, 曾臻, 等. 微透镜阵列超精密切削正弦过渡路径优化设计[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(4): 239-245.
- ZHANG X D, WANG ZH CH, ZENG Z, *et al.*. Optimized design of sine-transition cutting path for microlens array in ultra-precision cutting[J]. *Nano-technology and Precision Engineering*, 2017, 15(4): 239-245. (in Chinese)
- [8] ZHANG X, LIU K, SUNAPPAN V, *et al.*. Diamond micro engraving of gravure roller mould for roll-to-roll printing of fine line electronics [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225(11): 337-346.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] ZHU Z, To S, ZHANG S. Large-scale fabrication of micro-lens array by novel end-fly-cutting-servo diamond machining[J]. *Optics express*, 2015, 23(16): 20593-20604.
- [12] YI A Y, LI L. Design and fabrication of a micro-lens array by use of a slow tool servo[J]. *Optics letters*, 2005, 30(13): 1707-1709.
- [13] GONG H, WANG Y, SONG L, *et al.*. Spiral tool path generation for diamond turning optical freeform surfaces of quasi-revolution[J]. *Computer-Aided Design*, 2015, 59(2): 15-22.
- [14] WANG X, FU X, LI C, *et al.*. Tool path generation for slow tool servo turning of complex optical surfaces [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(1): 437-448.

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。Email: 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,现为哈尔滨工业大学精密工程研究所副所长,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。Email: bradywang@hit.edu.cn

通讯作者:



张鹏(1983—),男,黑龙江七台河人,博士,副教授,硕士生导师,2012年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事超精密加工新工艺与装备、微细超精密加工技术等方面的研究工作。Email: zp@hit.edu.cn