

## 微结构光学元件快速伺服刀架加工技术研究

李荣彬, 张志辉, 杜雪, 高栋, 王素娟  
(香港理工大学工业及系统工程学系先进光学制造中心, 香港)

**摘要:** 微结构光学元件是一种微小的拓扑元件, 通常分为微沟槽列阵、锥形列阵以及微透镜列阵等。这些微结构光学元件能在一些手持装置(例如手机)的平板显示器上得到先进的光学应用。由于产品微型化的需求越来越紧迫, 传统的刻蚀方法不再适用于加工高质量的光学微结构产品, 为此, 提出了一种新型的加工高质量光学微结构元件的技术。该技术以快速伺服刀架加工系统为基础, 并结合新开发的刀具轨迹生成器。该刀具路径生成器主要是针对快速伺服刀架加工系统而开发的, 它可以根据光学微结构元件的设计直接生成加工所需的刀具轨迹, 而不需要进行任何的后续处理。最后, 通过加工实例证明了上述加工系统的可行性并得到了符合要求的加工效果。

**关键词:** 超精密加工; 微结构光学元件; 刀具轨迹生成器; 光电及光通讯产品; 快速伺服刀架

**中图分类号:** TG58      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-6030(2005)03-0216-06

## An Investigation of Fast Tool Servo Machining of Optical Microstructures

LI Rong-bin, ZHANG Zhi-hui, DU Xue, GAO Dong, WANG Su-juan  
(Advanced Optics Manufacturing Centre, Department of Industrial and Systems Engineering,  
Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** Optical microstructures are small-scale topologies generally classified as grooves, pyramids, and micro-lens arrays which are finding applications in flat-panel displays used in hand-held devices such as mobile phones. As more stringent requirements are being imposed on the miniaturization of telecommunication products, the conventional etching process is found to be inadequate to fabricate high quality optical microstructures. This paper presents an effective technology for the fabrication of high quality optical microstructures based on fast tool servo (FTS) machining system incorporated with a purposely built tool path generator (TPG). The TPG allows the generation of a tool path directly from the design of the optical microstructures without the need for any data post-processing. The capability of the FTS machining system is demonstrated through a case study and satisfactory results were obtained.

**Keywords:** ultra-precision machining; optical microstructures; tool path generator; photonics products; fast tool servo(FTS)

随着市场需求的变化及发展, 微结构光学元件已成为用于光电及通讯产品的关键零部件, 例如数码相机、传真机、扫描仪、激光雕刻机、光电显示器、光纤通讯等光电产品和光通讯产品已形成了一个数以万亿计的全球市场<sup>[1,2]</sup>。加工如此复杂的光学零件必须采用

压电陶瓷感测器驱动的快速伺服刀架(fast tool servo, FTS)和多轴非对称的超精密加工技术。本文主要讨论V形微槽列阵和微镜列阵透镜等几种具有代表性的光学自由曲面。快速伺服刀架采用辅助的压电陶瓷驱动伺服系统, 具有工作行程长和响应频率高的特点, 能迅

收稿日期: 2005-06-15.

基金项目: 中华人民共和国香港特别行政区创新科技基金资助项目(ITS/201/01); 香港理工大学研究委员会资助项目(G-U023).

作者简介: 李荣彬(1952—), 男, 客座教授. E-mail: mfwblee@polyu.edu.hk.

速、精确地驱动金刚石刀具,加工出亚微米级的形状精度和纳米级表面粗糙度的光学微结构元件,并且不需要进行任何的后续加工处理。

光学微透镜阵列是指在一个平面基体上制作一系列微透镜阵列,主要用作显示设备的背光模组,如手机、数码相机、掌上电脑、掌上游戏机等电子设备的显示屏都采用了背光模组技术,使显示屏可以采用较少光源即获得更亮更均匀的效果。图1和图2所示为用微透镜阵列作背光模组的LCD的结构示意。

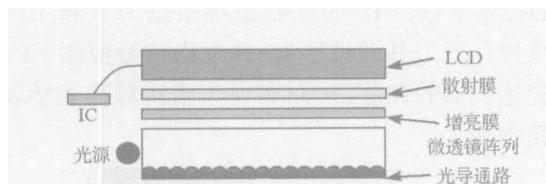


图1 微透镜阵列背光模组LCD的结构示意

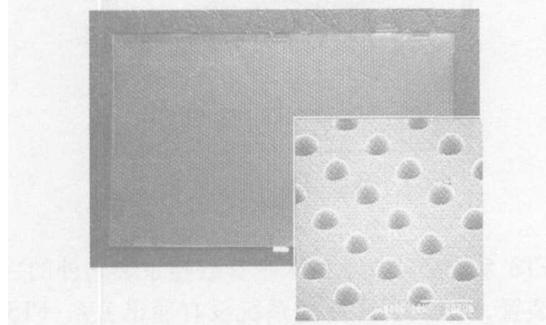


图2 微透镜阵列

现阶段通常采用电化学腐蚀、光刻等技术来直接加工微透镜阵列。电化学腐蚀方法需要加工特殊的电极,而且加工质量与材料的导电特性有很大的关系,加工精度的一致性较差。这里主要介绍采用超精密金刚石机床加工微透镜阵列的模芯,由模芯注射加工微透镜阵列的方法。

许多学者对超精密加工中压电陶瓷感测器驱动的快速伺服刀架进行了研究,并给出了许多不同的FTS定义。1986年,Donaldson和Thompson针对超精密车床设计出了快速伺服刀架。1999年,Cuttino等人发现,对于微定位系统来说,实体柔性铰链机构是十分有用的设计因素,对于这一装置,1998年,Shellekens等人提出了许多的设计方案。1990年,Hara等人设计了压电陶瓷驱动FTS系统,其工作行程为12 μm,响应频率为2 kHz,该FTS系统可以检测刀具与工件表面的瞬间接触,并使得加工的沟槽深度在亚微米级。1999年,Ludwick等人为了生产眼镜片发明了一种新型的FTS

系统。这时,已经有一些研究致力于将FTS系统用于提高金刚石切削加工的工件表面质量方面。1995年,Li等人提出了一种压电陶瓷精定位系统来补偿金刚石切削中的主轴误差。Shamoto和Moriwaki分别于1994年和1999年设计出不同的压电陶瓷驱动器,其目的是为了在精密定位中产生连续而连续的工作行程,同时,也能降低一部分金刚石刀具的振动,从而减轻刀尖的摩擦。1998年,Kim设计了一种可安装在普通车床上的压电陶瓷驱动器,其目的在于精确地控制切削深度并补偿工件表面产生的波纹。

压电陶瓷感测器驱动的快速伺服刀架(fast tool servo, FTS)具有进给的分辨率高(达到纳米级)、回应频率高(达到1 kHz)的特点,在精密和超精密加工领域中经常用来作误差补偿装置。根据FTS的这些特点,Precitech公司最近将FTS应用于超精密车床,作为车削加工非回转对称面的附加装置。

## 1 FTS加工非轴对称光学曲面

### 1.1 非回转对称表面的数学运算式

传统的回转对称的光学表面(如图3(a)所示)形状仅与距回转对称轴的距 $r$ 有关,与角度位置 $\varphi$ 无关,可以用非球面光学公式表示为

$$z_{\text{rot}}(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^n a_i r^i \quad (1)$$

对于非回转对称的光学表面(如图3(b)所示),表面形状不仅与距离回转轴的距离 $r$ 有关,而且与角

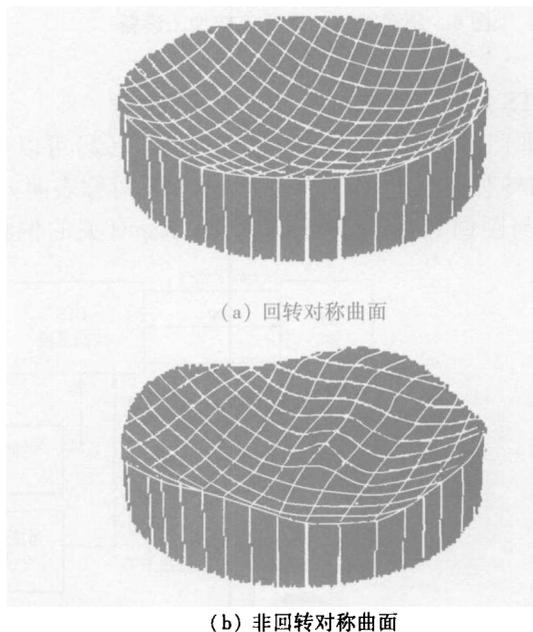


图3 回转对称和非回转对称的光学表面示意

度位置  $\varphi$  也有关,可以表示为

$$z_{\text{rms}}(r, \varphi) = z_{\text{rot}}(r) + z^*(r, \varphi) \quad (2)$$

### 1.2 FTS 加工

FTS 的加工设备和加工过程分别如图 4 和图 5 所示。FTS 加工时的材料去除过程不仅仅受切削工具、机床设计、FTS 的响应频率和工作行程、刀具的振动、主轴旋转引起的共振以及加工环境等因素的影响,而且还与材料的性质、刀具的几何参数以及被加工的光学微结构元件的几何形状密切相关。如今,对于 FTS 加工的切削机理、变形特性以及这些特性与 FTS 加工中光学微结构元件表面形成之间的关系等方面的探讨,现有的研究还远远不够。因此,在进行研究的时候,应该首先研究 FTS 加工各种不同光学微结构元件的切削机理和表面形成机制,具体加工过程如图 5 所示。为了确定和分析 FTS 加工光学微结构元件时对表面质量的影响因素,香港理工大学超精密加工中心在配备了 FTS 系统的 Nanoform 200 超精密机床上进行了一系列的切削试验,并使用非接触激光干涉表面测量系统和电子扫描显微镜对加工完成的表面进行了检测。

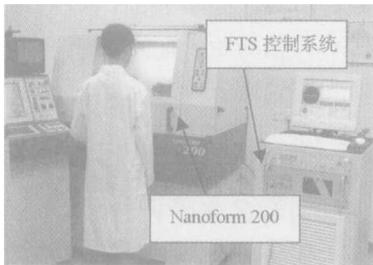


图 4 超精密快速伺服刀架加工设备

### 1.3 FTS 加工非回转对称光学表面的原理

从非回转对称光学表面的光学方程式(2)可以看出,非回转对称表面可以看成由一个回转对称表面  $z_{\text{rot}}$  和一个与距回转轴的距离  $r$ 、角度位置  $\varphi$  有关的偏移

$z^*(r, \varphi)$  叠加而成。 $z_{\text{rot}}$  由超精密车床的数控程序驱动来保证,  $z^*(r, \varphi)$  由 FTS 根据刀尖所处的位置  $(r, \varphi)$  来确定。图 6 表示了 FTS 加工非回转对称表面的工作原理。Precitech Nanoform 200 超精密金刚石车床采用 ULTRAPATHM III Control 作为机床数控系统,机床数控系统根据数控程序驱动金刚石刀具进刀。在加工过程中,刀具距离回转中心的位置可以通过激光检测系统测得,工件的角度位置可以通过机床主轴后端的光电码盘测得,并将刀具的径向位置和角度位置反馈给 FTS 的控制系统。FTS 的控制系统根据刀具和工件的当前位置计算刀具微进给量,并发出信号控制 FTS 压电陶瓷感测器的伸缩,从而实现非回转对称光学表面的超精密加工。



图 5 快速伺服刀架加工过程

FTS 系统是独立于机床本身数控系统之外的一套附加装置,FTS 与机床数控系统没有通讯关系,FTS 的输入是由光电码盘测得的工件角度位置和由激光干涉仪测得的刀具径向位置;在非轴对称光学表面加工过程中,非轴对称的光学表面由轴对称和轴向偏移两部分叠加而成,其中轴对称部分由机床数控系统完成,轴向偏移部分由 FTS 微进给刀架系统实现;由于 FTS 微进给范围和响应频率的限制,用 FTS 来实现非轴对称光学表面加工有一定的局限性。香港理工大学先进光学制造中心的 Precitech Nanoform 200 配备的 FTS35 系统的最大微进给行程为  $35 \mu\text{m}$ , 最高响应频率为 1

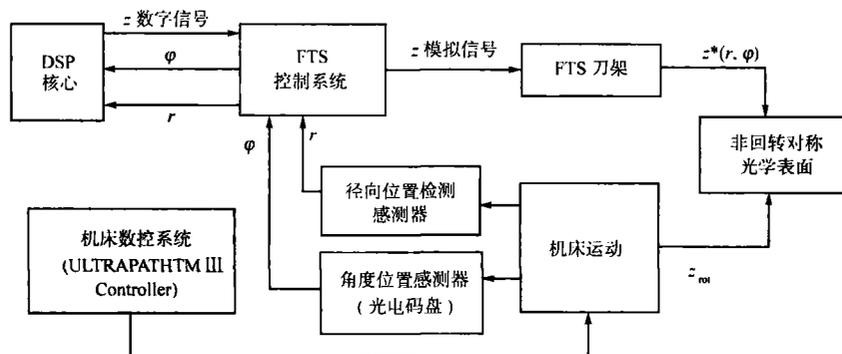


图 6 快速伺服刀架加工非回转对称光学表面工作原理

kHz. 图7为FTS刀架在加工过程中,微进给切削长度与主轴转速、FTS的响应频率以及工件回转尺寸间的关系示意.

FTS的最小走刀距离可以表示为

$$L_{\min} = \frac{n\pi R}{60f_{\max}} \quad (3)$$

式中: $n$ 为主轴转速; $R$ 为工件半径; $f_{\max}$ 为FTS的最大响应频率. FTS的最高响应频率为1 kHz,对半径为40 mm工件,转速在100 r/min的情况下, $L_{\min}$ 为0.21 mm. 如果刀具在工件的每个圆周上进给次数 $n'$ (number of elements per rev)一定,主轴的最高转速为

$$n_{\max} = \frac{f_{\max} \cdot 60}{n'} \quad (4)$$

如果FTS刀具在工件的每个圆周上进给次数为20,由于FTS的最大响应频率为1 kHz,主轴最高转速则为3 000 r/min. 进刀情况如图8所示.

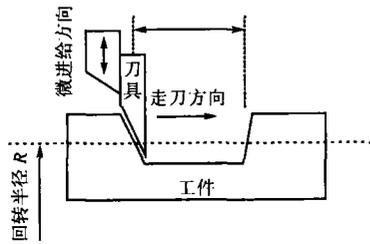


图7 快速伺服刀架走刀示意

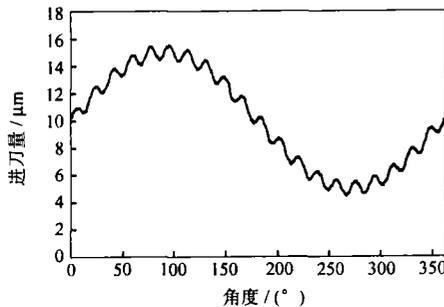


图8 进刀情况(FTS刀具在工件的每个圆周上进给次数为20)

FTS的进给控制系统是与机床数控系统相对独立的系统,Precitech公司提供了SOP系统作为FTS的控制系统,来实现在超精密车床上用FTS加工非轴对称光学表面. SOP的精密运算和实时控制主要由数字信号处理器(DSP)为内核的运算单元完成,图9所示为SOP系统的用户界面,用户界面表示了非轴对称表面加工的二维仿真图与与DSP的信息交互状况. SOP控制软件采用C语言作为程序语言,支持C语言的基本

函数,并且为用户预留了一个float LinkFunction(float phi, float r)函数作为界面函数,用户可以将要加工的非轴对称表面用C语言的方式进行数学描述并写入float LinkFunction(float phi, float r)函数中,从而实现非轴对称光学表面的超精密加工,非常方便.

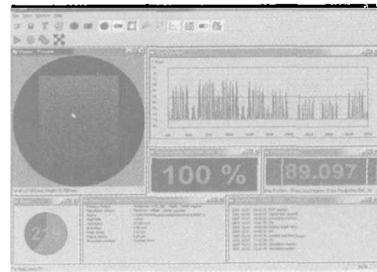


图9 标准操控程序的用户界面

## 2 FTS加工光学微透镜阵列

光学微透镜阵列可以看成是由机床数控系统加工平面和FTS加工微透镜阵列的一种特殊的非轴对称光学表面. 要实现微透镜的加工,就要根据微透镜的分布及形状参数编写float LinkFunction(float phi, float r)函数(如图10所示). FTS的控制软件SOP的输入参数是 $r$ 和 $\phi$ ,而微透镜阵列的布局通常用笛卡尔坐标表示,所以要将笛卡尔坐标的表示形式转换成极坐标的形式,而且让 $\phi$ 从 $\phi = 0^\circ$ 到 $\phi = 360^\circ$ , $r$ 从 $r = 0$ 到 $r = r_{\max}$ 进行遍历,从而加工出微透镜阵列.

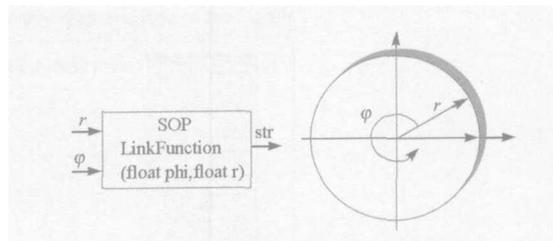


图10 标准操控程序函数及遍历方式

针对采用FTS加工光学微透镜阵列,香港理工大学先进光学中心开发了一套加工微透镜阵列的自动编程软件. 图11表示了这套软件的工作流程. 首先根据微透镜阵列的透镜参数和分布情况进行设计,自动生成float LinkFunction(float phi, float r)函数,并根据float LinkFunction(float phi, float r)生成三维微透镜阵列的仿真结果. 香港理工大学最近新购进Precitech Nanoform 200超精密车床,配备有Fast Tool Servo系统——FTS35,利用该系统可以加工深度小于35 μm的微透镜阵列或者其他微结构.

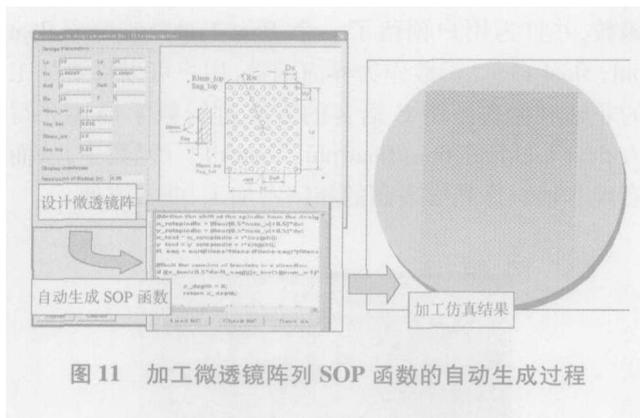


图 11 加工微透镜阵列 SOP 函数的自动生成过程

### 3 实例研究与分析

以微透镜阵列背光板的制造过程为例进行分析研究. 首先,使用光学设计软件 TracePro 设计微透镜阵列背光板,并对其光学性能进行仿真,设计结果如图 12 所示. 之后可以对光学设计结果进行不断优化,直到其满足要求为止. 从图 13 中可以看到,在微透镜阵列背光板的作用下,预先设定的 LED 光线强度被均匀地分散了. 然后将最优化的设计结果输入刀具轨迹生成器,就能产生驱动代码,从而控制 FTS 系统加工出注塑塑料微透镜阵列所需的模芯(图 14).

目前的研究通常是使用装备了 FTS 的 Nanoform 200 超精密加工设备(图 4)加工模芯,然后采用 WykoNT8000 非接触光学表面形状测量系统对微透镜

阵列的外形和表面粗糙度进行测量. 图 15 和图 16 分别给出了表面粗糙度的测量结果和注塑完成的微透镜阵列. 令人惊奇的是,单个微透镜的表面粗糙度可以控制在几个纳米以下.

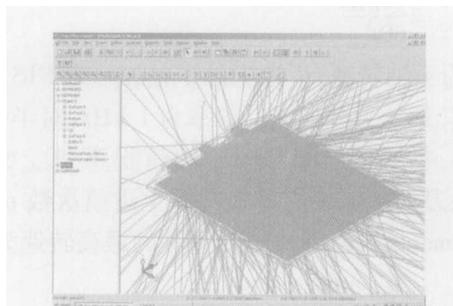


图 12 采用 TracePro 设计的微透镜阵列

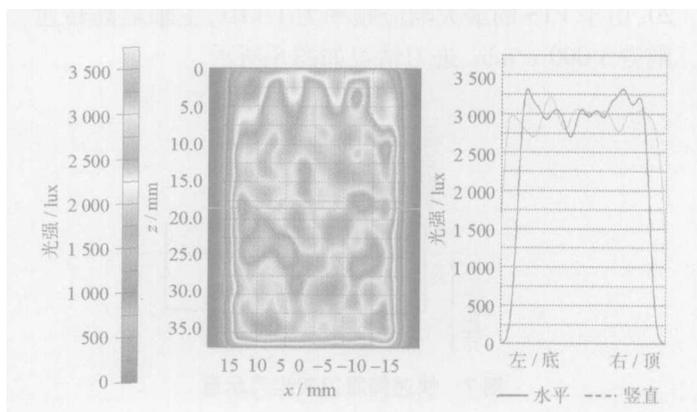


图 13 微透镜阵列的光学性能仿真

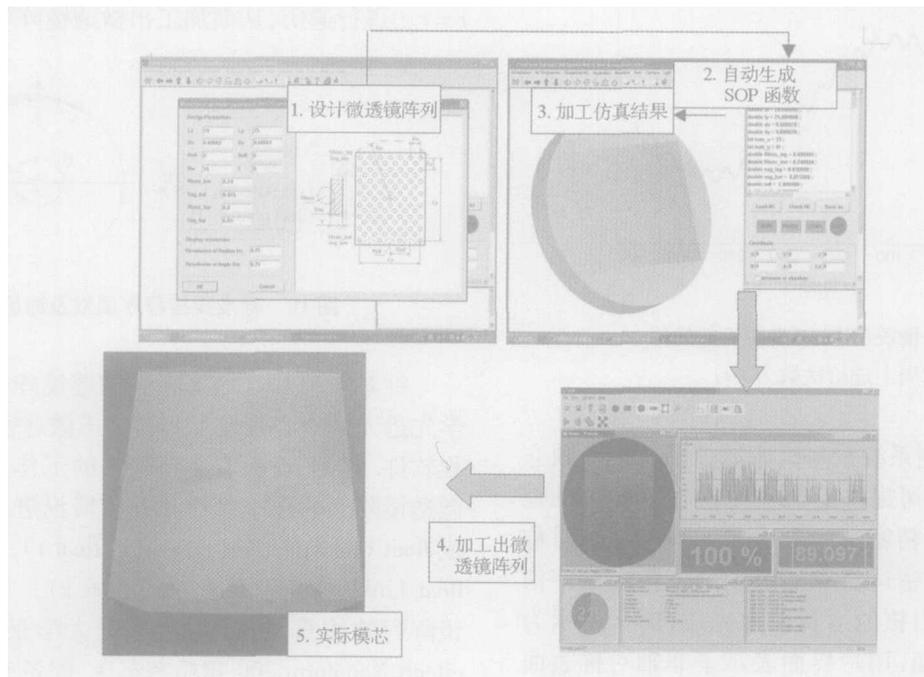


图 14 通过刀具轨迹生成器加工微透镜阵列的流程

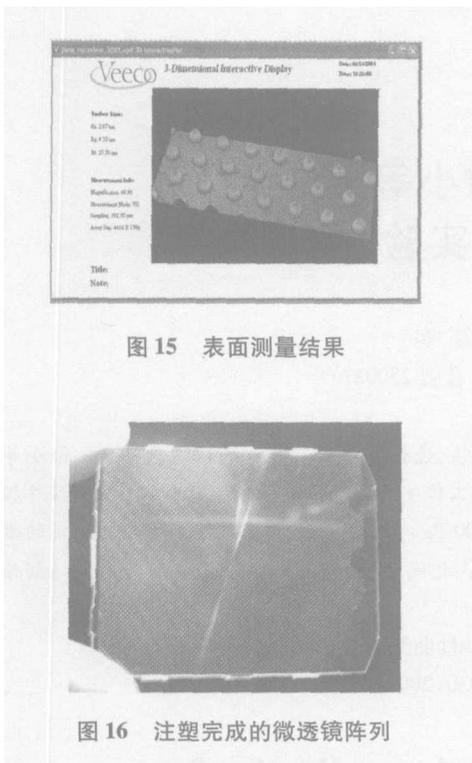


图 15 表面测量结果

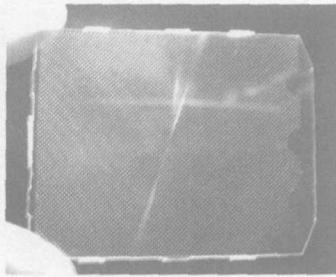


图 16 注塑完成的微透镜阵列

#### 4 结 语

如今,手持装置的大部分显示系统都需要使用微结构光学元件,例如手机、笔记本电脑、个人数字助理等等。微结构光学元件是指一些微型的拓扑元件,通常被分为微沟槽阵列、微透镜阵列、锥形阵列、透镜光栅和阶梯光栅等。超精密金刚石切削加工高质量的微结构光学元件时,要求刀具驱动响应频率比曲面的回转频率高得多,而普通的滑动导轨很难满足该要求,因为滑动导轨的摩擦力很大,使得其固有频率也很低。由于 FTS 系统具有进给范围长和响应频率高的特点,通常将 FTS 安装在超精密金刚石机床上加工高质量微结构光学元件。采用该系统加工亚微米级形状精度和纳米级表面粗糙度的微结构光学元件时,不需要再进行任何的后续加工处理,所以,FTS 加工系统为加工光学微结构元件提供了一种不可缺少的方法。

然而,目前对于 FTS 加工微结构光学元件的切削机理及其与加工表面的形成关系的研究还远远不够。在本文中,研究了 FTS 加工微结构光学元件的切削机理和表面形成机制,并针对 FTS 加工系统,结合光学

设计的性质建立了一个刀具轨迹生成器(TGP)。香港理工大学超精密加工中心在装备了 FTS 系统的 Nano-form 200 超精密机床上进行切削试验,证明了该刀具轨迹生成器的可用性。采用非接触激光干涉表面测量仪对被加工工件的表面质量进行测量,结果表明该表面能满足要求。

#### 参考文献:

- [1] 李鸿均. 全球光电产业发展概况[J]. 光讯, 2002(97): 1—6.
- [2] Lee W B, To S, Cheung C F, et al. Ultra-precision machining of optical microstructures[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2003(1): 57—61.
- [3] Cuttino J F, Miller Jr A C, Schinstock D E. Performance optimization of a fast tool servo for single-point diamond turning machines[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 1999, 4(2): 169—179.
- [4] Donaldson R R, Thompson D C. Design and performance of a small precision CNC turning machine[J]. *Annals of the CIRP*, 1986, 35(1): 373—376.
- [5] Hara Y, Motonishi S, Yoshida K. A new micro-cutting device with high stiffness and resolution[J]. *Annals of the CIRP*, 1990, 39(1): 375—378.
- [6] Kim J D, Kim D S. Waviness compensation of precision machining by piezoelectric micro cutting device[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, 38: 1 305—1 322.
- [7] Li C, James C, Li S. Improve workpiece roundness in precision diamond turning by in-stu metrology and repetitive control[J]. *Proc ASME DSC*, 1995, 57(1): 567—572.
- [8] Ludwick S J, Chargin D A, Calzaretta J A, et al. Design of a rotary fast tool servo for ophthalmic lens fabrication[J]. *Precision Engineering*, 1999, 23: 253—259.
- [9] Schellekens P, Rosielle N, Vermeulen J, et al. Design for precision: Current status and trends[J]. *Annals of the CIRP*, 1998, 47(2): 557—586.
- [10] Shamoto E, Moriwaki T. Study on elliptical vibration cutting[J]. *Annals of CIRP*, 1994, 43: 35—38.
- [11] Shamoto E, Moriwaki T. Ultraprecision diamond turning cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting[J]. *Annals of the CIRP*, 1999, 48(1): 441—444.