

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0042- 06

## 音圈式快速伺服刀架的分析与设计\*

杨帆, 杨海宽, 陈志华, 王贵林

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**自由曲面光学零件面形复杂, 快刀伺服车削加工是其高效加工手段。针对压电陶瓷型伺服刀架行程小, 加工能力有限的问题, 提出一种基于音圈式直线电机驱动的快刀伺服方案。音圈式快速伺服刀架行程大, 可大大拓宽快刀伺服加工范围。以典型光学零件加工为例, 对快速伺服刀架所应具备的关键性能指标进行分析, 给出了音圈电机的结构, 对音圈式伺服刀架进行了理论建模、控制器设计以及实际性能测试。测试结果表明, 所设计的音圈式伺服刀架行程大、频响高, 在刀架行程为  $\pm 100\mu\text{m}$  时可达到 300Hz 的频响能力, 同样行程下的频响指标优于国外同类产品。

**关键词:**光学自由曲面; 快刀伺服; 音圈电机; 行程; 频响

中图分类号: TH871 文献标识码: A

## Analysis and Design of Voice-coil Actuator Used in Fast Tool Servo

YANG Fan, YANG Hai-kuan, CHEN Zhi-hua, WANG Gui-lin

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Free-Form optics have complicated surfaces and the fast tool servo (FTS) is a highly effective method to fabricate such parts. With regard to the fact that the piezoelectric FTS actuator has limited fabricating capacity as of its low stroke, a long stroke FTS project driven with voice coil actuator (VCA) was presented. Compared with piezoelectric actuator, the VCA can fabricate broader range of parts owing to its longer stroke. Illustrated with a typical optical freeform part, the key performance parameters of FTS are analyzed. The structure of VCA was given, the theoretical model of VCA was built, the closed-loop controller was designed and the actual performance of VCA actuator was tested. The test results indicate that the designed VCA actuator has long stroke and high frequency response, and the frequency response can reach 300Hz when at stroke of  $200\mu\text{m}$ . More important, at this level of stroke, the frequency response presented is better than similar products abroad.

**Key words:** optical freeform surfaces; Fast Tool Servo (FTS); voice coil actuator; stroke; frequency response

光学自由曲面是指非轴对称、不规则、随意构造的曲面, 其形状比较复杂, 加工精度要求很高。应用自由曲面的光学器件能大大简化系统结构, 提高成像质量, 降低系统成本。大型天文望远镜的光学镜头, 日常生活中的照相机、显示器, 手机背光模组, 军用装备如红外夜视仪、军用头盔等都广泛使用了自由曲面的光学器件<sup>[1]</sup>。

光学自由曲面的精密高效加工非常困难, 传统加工方法如光刻、电化学腐蚀等方法效率低, 加工一致性差, 难以满足技术要求。国外学者近年来发展了以天然金刚石为刀具的快刀伺服 (fast tool servo, FTS) 单点钻石车削加工技术<sup>[2]</sup>, 如图 1 所示。高频响、

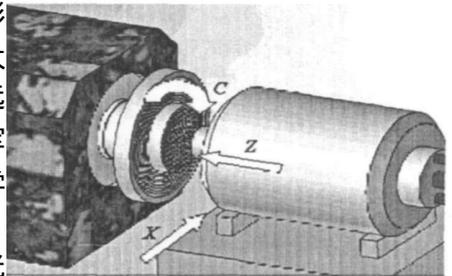


图 1 快速车削示意图

Fig. 1 Fabricating principle of FTS

高精度的驱动装置使刀具在 Z 向产生快速进刀运动, 通过与 C 轴的回转运动、X 轴的径向进给运动相结合, 实现复杂面形零件的车削加工。这种方式一次加工即可获得超精密的面形精度, 加工效率和柔性

\* 收稿日期: 2009- 04- 10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50735007)

作者简介: 杨帆 (1977-), 男, 讲师, 博士生。

化程度很高,经济效益显著,因此受到了广泛的关注与研究。目前美国、新加坡等国家已经出现了较为成熟的 FTS 系统<sup>[3]</sup>,国内一些大学与科研机构对于快刀伺服加工技术的研究已有报道,但由于起步较晚,加之缺乏相应超精密的机床平台,快刀伺服的研究尚处于摸索阶段<sup>[4]</sup>。

FTS 加工时 FTS 刀架是独立于机床数控系统之外的一套附加装置,它实时采集主轴转角位置及机床径向位置控制进刀量。国外商品化的 FTS 刀架大多是以压电陶瓷作驱动,行程小于 100 $\mu\text{m}$ ,频响最高可达 1000Hz<sup>[5]</sup>。随着现代光学系统应用要求的提高,对面形落差在 100 $\mu\text{m}$  以上的复杂光学零件需求越来越多,压电陶瓷型 FTS 对此加工已无能为力,研究大行程的 FTS 系统是快刀伺服加工技术今后的发展方向,国外现已有成形产品。本文提出一种基于大行程高频响音圈式直线电机驱动的快刀伺服方案,对快刀伺服刀架所应具备的关键性能指标进行分析,对音圈电机的结构以及闭环控制器进行设计,在 200 $\mu\text{m}$  的工作行程时设计频响为 200Hz。

## 1 快速伺服刀架的性能指标分析

图 2 所示为美国国家宇航局大型红外目标分光计 (IRMOS) 中的关键零件——离轴双锥镜<sup>[6]</sup>,这是典型的自由曲面光学零件。其非旋转对称部分最大落差达 350 $\mu\text{m}$ ,其面形数据的最高谐波分量为 180Hz,快速伺服刀架要实现对其面形的精确跟踪,至少要具备 350 $\mu\text{m}$  的行程,且不低于 180Hz 的频响。假定伺服刀架在 350 $\mu\text{m}$  的行程时具备 200Hz 频响,经简单分析可得,刀具要能在 2.5ms 时间完成指令要求的位置变化,即运动平均速度要达到 0.14m/s,加速度 11.2g。传统的由电机-丝杠-螺母组成的串联型结构,其极限加速度为 1g,显然无法满足加工频响要求;压电陶瓷型 FTS 刀架一般不具备 350 $\mu\text{m}$  的工作行程,无法满足加工行程要求;而大行程的音圈式伺服刀架则可同时满足行程与频响的要求。

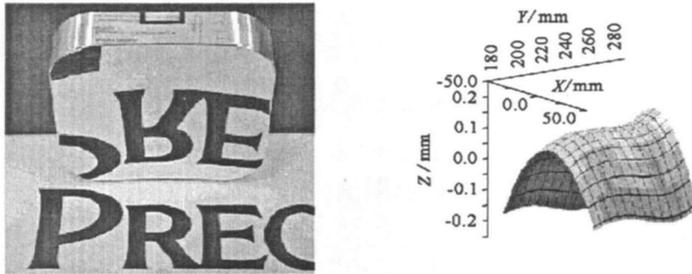


图 2 离轴双锥镜  
Fig. 2 Off axis biconic mirror

由上例可见,行程、频响、精度是 FTS 刀架的三个主要指标,共同决定了伺服刀架的加工能力。行程由 FTS 刀架的物理结构和工作原理所决定,频响受刀架物理结构与刚性的限制,同时也受外部功率驱动能力的限制,不可能无限高,精度则取决于刀架闭环位置传感器的精度和分辨率。人们都期望 FTS 刀架能同时满足大行程、高频响、高精度,但由运动学方程可知,刀架的行程  $s$  与达到目标位置的时间  $t$  及刀架加速度  $a$  有如下关系:

$$s = \frac{1}{2} a^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2s}{a}} \Rightarrow f = \sqrt{\frac{a}{2s}} \quad (1)$$

可见刀架的频响  $f$  与行程  $s$  的平方根成反比。行程大,频响势必降低。行程与频响本身是一对矛盾,因此在确定伺服刀架的具体指标时往往是取某种折中以获得最佳效果。

除行程、频响、精度等关键指标外,FTS 刀架还需要有一定的鲁棒性和刚度,以有效抑制外界的未知扰动。对于光学超精密加工而言,其切削量一般在 10 $\mu\text{m}$  以下,加工时的切削力很小,一般来说,经过良好控制的伺服刀架其刚度指标可得到满足,刀架的鲁棒性可由控制策略来保证。

## 2 音圈式刀架的结构设计与建模分析

音圈式刀架是一种将电信号转换成直线位移的装置,它基于安培力原理,即通电线圈在磁场中受力而产生运动,力的大小与施加于线圈的电流成正比。与小行程压电陶瓷型伺服刀架相比,音圈式刀架具有更大的工作行程。音圈式刀架的频响性能有赖于刀架可动体所能达到的最大加速度,一方面要合理设计刀架可动体,如线圈的结构、材质等,以尽可能减轻可动体质量,另一方面要合理设计刀架的磁路,同时采用能提供足够电流的功率驱动设备以获得尽可能高的驱动力,也即为了提高刀架的频响指标,刀架需要具备较大的输出力与惯量比。

按照运动部件是音圈还是磁铁系统,音圈式刀架可分为动音圈结构与动铁式结构<sup>[7]</sup>。与动铁式结构相比,动音圈结构的优点是作为定子的永磁体可以比较大,可以得到较强的磁场(高  $B$  值);而且作直线运动的音圈其质量也远小于磁体的质量,因而动圈式刀架具有较高的输出力与惯量比,频响较高。本文设计了动圈式音圈电机作为快速伺服刀架,设计行程为 1.5mm。其外形如图 3 所示。

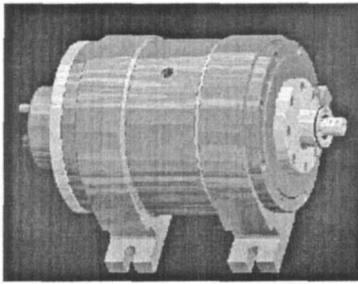


图 3 音圈式伺服刀架外形  
Fig. 3 Outer shape of VCA

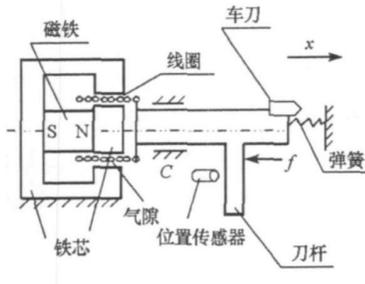


图 4 音圈式伺服刀架结构简图  
Fig. 4 Structure sketch of VCA

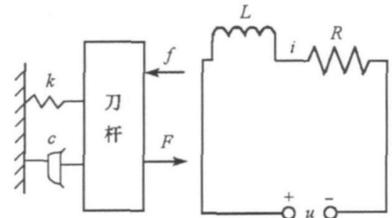


图 5 等效模型  
Fig. 5 Equivalent model

音圈电机的结构可用图 4<sup>[8]</sup>来表示,铁芯、线圈和永磁体组成了闭合磁路。磁通经过极靴被均匀地分布在环形气隙中,采用长线圈来保证磁场中有足够长的导线切割磁力线以产生比较大的安培力。除了  $x$  方向外,其他方向的自由度均由相应的机构所限制。当线圈通电时,安培力使刀杆在  $x$  方向产生直线运动,刀杆的运动形式取决于驱动电流。

音圈电机实际为一机电耦联系统,可以等效为相应的力模型与电路模型。如图 5 所示,力模型中弹簧  $k$  和刀杆组成了弹性刀架,弹簧  $k$  使刀杆恢复到平衡位置, $f$  为切削力在  $x$  方向的分量, $F$  为安培力。支撑系统对刀杆的运动有粘性阻尼作用,其阻尼系数为  $c$ , $m$  为可动部分(包括线圈及刀杆)的质量。电路模型中  $L$  为线圈感抗, $i$  为线圈电流, $R$  为驱动电路及线圈总电阻, $u$  为线圈两端激励电压。采用高精度位置传感器来实现闭环控制。可列出如下两个重要方程:

力平衡方程:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = Bil - f \quad (2)$$

电压平衡方程:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + Bl \frac{dx}{dt} = u \quad (3)$$

进一步分析,线圈电感  $L$  实际上很小,可以忽略。(3) 式中记  $L = 0$ , 求解  $i$  并代入(2)式可得

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \left( c + \frac{B^2 l^2}{R} \right) \frac{dx}{dt} + kx = \frac{Blu}{R} - f \quad (4)$$

在不考虑切削力( $f = 0$ )的情况下,对(4)式进行拉氏变换,可得到

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{Bl/(kR)}{T_0^2 s^2 + 2T_0 \xi s + 1} \quad (5)$$

式(5)即为音圈伺服刀架的传递函数,它是一个 MFK(质量弹簧阻尼)二阶系统。它有如下性质:

(1)  $T_0 = \sqrt{\frac{m}{k}}$ , 也即系统的时间常数。此式表明,在设计时若减少可动部分的质量  $m$  和提高弹簧的刚度  $k$  都有利于提高响应速度,进而提高刀架的频响。

(2)  $\xi$  为阻尼系数且

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{cR + B^2 l^2}{R \sqrt{mk}} = \frac{1}{2 \sqrt{mk}} \left( c + \frac{B^2 l^2}{R} \right) \quad (6)$$

阻尼特性影响系统的动态特性。上式说明整个系统的阻尼由机械阻尼  $c$  与电磁阻尼  $\frac{B^2 l^2}{R}$  二部分组成,可以通过对阻尼参数的优化设计来提升系统动态性能。之所以存在电磁阻尼,是因为线圈运动时切割磁力线产生反电动势,且反电动势与线圈激励电压反向。反电动势会降低线圈电流,从而减少了安培力。这要求音圈电机的功率驱动器要经优化设计以提供恒定电流,关于功率驱动器的设计可以参阅文献[9]中的相关论述。

(3) 开环增益为  $A = \frac{Bl}{kR}$ , 开环增益决定了刀架的最大行程。式中  $B$ 、 $l$ 、 $k$ 、 $R$  都是音圈电机的物理参数,可以通过对上述参数的合理设计以提高刀架的工作行程。

### 3 伺服刀架参数辨识与控制器设计

为了获取所设计音圈式伺服刀架准确的模型参数,对伺服刀架进行了开环扫频测试并进行了系统辨识。辨识模型为

$$G_o = \frac{198400}{s^2 + 48.24s + 611400} \quad (7)$$

相应可得:  $T_0 = 0.00127s$ ,  $\xi = 0.0308$ , 可见所设计的音圈式伺服刀架为低阻尼的系统,其阶跃响应及开环频率特性分别如图 6、图 7 所示。由图 7 可见,音圈伺服刀架的固有频率约为 130Hz。

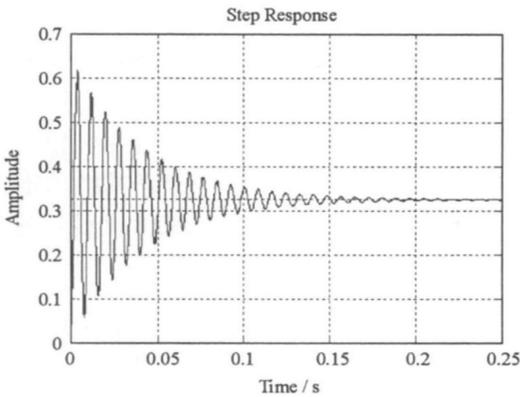


图 6 开环阶跃响应  
Fig. 6 Step response of VCA plant

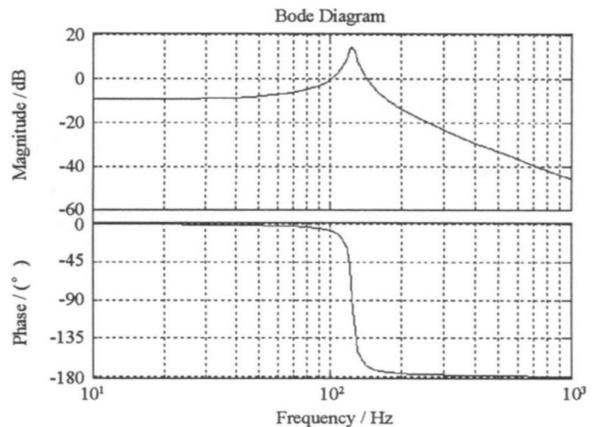


图 7 开环系统 Bode 图  
Fig. 7 Bode graph of VCA plant

如果不加控制即将此低阻尼的刀架用于光学零件的加工,势必在零件表面留下颤纹,而且刀架频响也达不到加工一般复杂光学零件所需 200Hz 的频响要求,必须设计控制器使得伺服刀架具备足够高的频响、刚度与抗扰性能。在所得开环辨识模型基础上,应用 MATLAB 的 SISOTools 工具箱进行零极点匹配串联校正控制器设计,充分考虑频响、刚度与抗扰性指标的设计要求,最终得到的控制器传递函数为

$$C(s) = \frac{13787639.1212(s + 106)(s + 1016)(s^2 + 47.39s + 6.245e005)}{s^2(s + 9046)(s + 3.462e004)(s + 2205)} \quad (8)$$

校正后仿真系统的阶跃响应与开闭环 Bode 图分别如图 8 与图 9 所示。

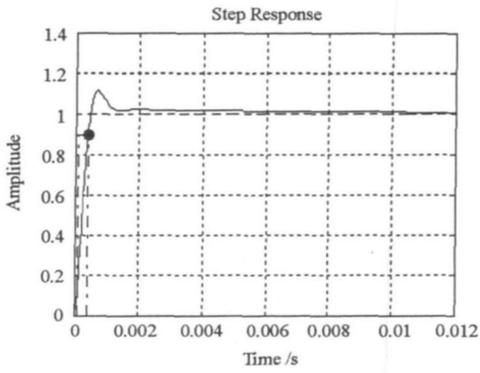


图8 闭环系统的阶跃响应  
Fig. 8 Step response of closed-loop system

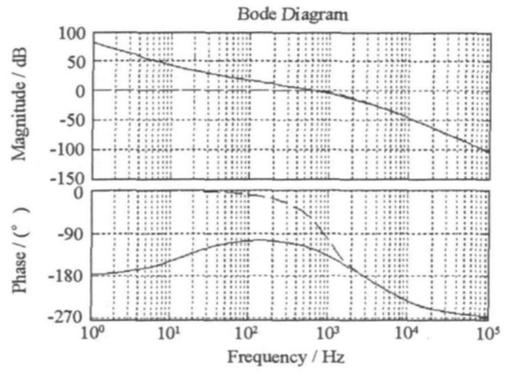


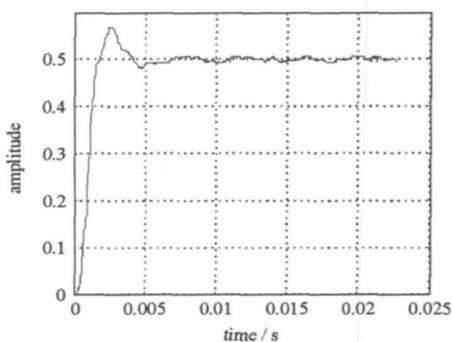
图9 开闭环系统波特图  
Fig. 9 Bode graph of open-loop and closed-loop system

由仿真图可见闭环系统阶跃响应的上升时间为 0.3ms, 相角裕度为  $108^\circ$ , 幅值裕度为 19.9dB, 闭环仿真带宽达到了 600Hz。

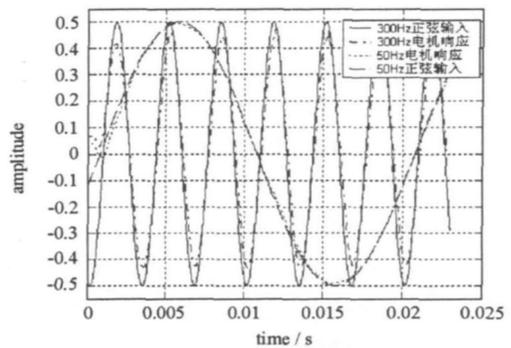
#### 4 音圈式快速伺服刀架实际性能测试

为测试伺服刀架的辨识模型是否准确, 基于 MATLAB 设计出的控制器能否应用于音圈电机的实际控制, 以及控制性能如何, 以 TI DSP2812 高性能处理器为实时控制平台(12 位 AD、12 位 DA、5kHz 伺服更新率), 高精度电涡流位移传感器(量程  $\pm 1\text{mm}$ , 对应输出  $\pm 5\text{V}$ ) 作为位置反馈元件, 式(8) 控制器经 5kHz 采样后的离散控制器作为实际控制器, 搭建数字闭环控制系统。测试伺服刀架在  $100\mu\text{m}$  行程时的阶跃响应以及在  $\pm 100\mu\text{m}$  行程时伺服刀架对于不同频率正弦输入信号的跟踪性能。

图 10(a) 为刀架在阶跃幅度  $100\mu\text{m}$ (对应输出 0.5V) 时的阶跃响应, 可见实际阶跃响应上升时间约 1ms, 这是由于音圈伺服刀架可动体存在一定的惯性。图 10(b) 为在  $\pm 100\mu\text{m}$  行程时伺服刀架分别对于低频 50Hz 正弦输入、高频 300Hz 正弦输入的闭环响应及与相应参考输入信号的比较图, 由图可见, 在低频 50Hz 输入时伺服刀架能够很好地跟踪参考输入, 在高频 300Hz 正弦输入时的响应幅值也仅比参考输入信号的幅值衰减 5% 左右, 这说明闭环伺服刀架在  $\pm 100\mu\text{m}$  行程时达到了 300Hz 的频响指标。实验也发现, 伺服刀架对于频率高于 320Hz 以上的信号衰减很快。在  $200\mu\text{m}$  这样较大行程的 FTS 系统中, 美国 Precitech 公司 2005 年研制出了采用音圈式直线电机作驱动部件的 FTS500 系统<sup>[10]</sup>, 根据其技术指标及性能测试数据, 其刀架最大行程可达  $500\mu\text{m}$ , 在  $200\mu\text{m}$  行程时刀架频响达到了 180Hz, 而本文设计的音圈式伺服刀架在同样行程下的频响达到了 300Hz。



(a)  $100\mu\text{m}$  行程时的环阶跃响应



(b)  $\pm 100\mu\text{m}$  行程不同参考频率的电机响应

图 10 伺服刀架的实际性能测试  
Fig. 10 Real performance testing of servo actuator

## 5 结论

(1)行程、频响和精度是 FTS 系统加工复杂面形光学零件所应具备的关键性能指标,决定了快刀伺服系统的加工能力。压电陶瓷型 FTS 行程低于 100 $\mu\text{m}$ ,加工能力有限,音圈式 FTS 行程较大,具有宽广的加工能力。

(2)动圈式音圈电机具有较大的输出力与惯量比,易于获得较高的频响指标。理论建模和参数辨识表明本文设计的音圈式伺服刀架为低阻尼的特性,必须设计良好的控制器才能实际应用。

(3)仿真及实际测试结果表明,本文所设计的音圈式伺服刀架具有良好的本体特性和可控性,伺服刀架在 $\pm 100\mu\text{m}$ 行程时可达到 300Hz 的频响能力,同样行程下的频响指标优于国外同类产品,这一结论为后续研究和产品升级开发提供了可靠借鉴。

## 参考文献:

- [1] 李荣彬,杜雪,张志辉.自由曲面光学设计与先进制造技术[R].香港理工大学先进光学制造中心,2005.
- [2] 吴丹,谢晓丹,王先逵.快速刀具伺服机构研究进展[J].中国机械工程,2008,19(11):1379-1385.
- [3] Gan S W, Rahman M, Lin H S. A High Precision Piezoelectric Fine Tool Servo System for Diamond Turning[C]//The 1st International Conference on Nanomanufacturing (NanoMan2008), Singapore, 2008.
- [4] 汪亮,罗松保.快速伺服刀具技术发展现状及趋势[J].航空精密制造技术,2007,43(6):13-16.
- [5] Fast Tool Servo Module for Precision Lathes[Z]. <http://www.kineticeamics.com/pdf/fts400-500-600-brochure.pdf>.
- [6] Machining a Bionic Mirror[Z]. <http://www.pec.ncsu.edu/research/projects/bionic/>.
- [7] 张大卫,冯晓梅.音圈电机的技术原理[J].中北大学学报(自然科学版),2006,27(3):224-228.
- [8] 陈志华.非圆截面零件车削控制研究[D].国防科技大学,2000.
- [9] 宋文峰.新型直线电机驱动器的研究[D].国防科技大学,2003.
- [10] Rogers K. Freeform Machining with Precitech Servo Tool Options[Z]. <http://www.precitech.com/FreeformmachiningwithPrecitechServoTools052505.pdf>.

(上接第 35 页)

## 5 结论

光学阵列器件可以看作自由曲面通过慢刀伺服车削的方法加工。但是由于光学阵列器件面形复杂及法线方向突变的特点,必须根据机床伺服轴的执行能力选择合适的刀具半径补偿方法。实验结果表明,慢刀伺服车削光学阵列器件面形精度可以达到亚微米级,粗糙度可达到纳米级。

## 参考文献:

- [1] Diamond turning workpiece[Z]. <http://www.ii-vi.com>.
- [2] Hashimoto Y, Takeuchi Y, Kawai T, et al. Manufacture of Fly-eye Mirror in Extreme Ultraviolet Lithography Illumination System by Means of Ultraprecision Diamond Cutting[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4688: 656-663.
- [3] Kim H S, Kim E J, Song B S. Diamond Turning of Large Off-axis Aspheric Mirrors Using a Fast Tool Servo with On-machine Measurement[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146: 349-355.
- [4] Gao W, Araki T, Kiyono S, et al. Precision Nano-fabrication and Evaluation of a Large Area Sinusoidal Grid Surface for a Surface Encoder[J]. Precision Engineering, 2003, 27: 289-298.
- [5] Lu X D, Trumper D L. Ultrafast Tool Servos for Diamond Turning[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 2005, 54: 383-388.
- [6] Lu X D, Trumper D L. Spindle Rotary Position Estimation for Fast Tool Servo Trajectory Generation[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 147: 1362-1367.
- [7] Yi A Y, Li L. Design and Fabrication of a Microlens Array by Use of a Slow Tool Servo[J]. Optics letters, 2005, 30(13): 1707-1709.