

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0031- 05

光学阵列器件的慢刀伺服车削加工技术*

关朝亮, 铁贵鹏, 尹自强

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:慢刀伺服技术是相对于快刀伺服提出的方法。采用 C 轴、 X 轴、 Z 轴联动的方法在极坐标或圆柱坐标内进行加工。光学阵列如微透镜阵列、微反射镜阵列在高速数据、声音和视频信号传输中具有重要作用。将光学阵列看作一个自由曲面, 使用慢刀伺服车削技术一次加工成形, 可以解决传统加工中将光学阵列分块加工后拼装和调整的困难。但是由于光学阵列表面形状复杂, 其表面法线的突变可能会使机床运动超出伺服轴执行能力。根据慢刀伺服加工技术的特点, 建立了伺服轴执行能力限制曲线, 研究了不同刀具半径补偿方式对加工的影响。实验结果表明, 根据机床伺服轴执行能力合理选择刀具半径补偿方式可实现微光学阵列器件高精度加工。

关键词:慢刀伺服; 超精密车削; 光学阵列; 自由曲面

中图分类号:TH161 **文献标识码:**A

Fabrication of Array Lens Optical Component by Using of Slow Tool Servo Diamond Turning

GUAN Chao-liang, TIE Gui-peng, YIN Zi-qiang

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

Abstract: Slow Slide Servo, in comparison with Fast Slide Servo, is a novel machining process capable of generating freeform optical surfaces or rotationally non-symmetric surfaces at high level of accuracy. It is processed in the polar and cylinder coordinates with the method of C , X and Z axes. Micro-optical devices, e. g., micro lenses, micro mirrors, play an important role in high speed data, voice and video signal transmissions. Micro array lens can be treated as a freeform surface and therefore can be machined by slow tool servo method. In the tool radius compensation, the discontinuity of normal direction may cause the lathe motion beyond servo axis' capability. In the current research, servo axes limitation motion capability was analyzed and two tool radius compensation methods were studied. Experiments show that by correctly selecting tool radius compensation method, slow tool servo can manufacture array lens in a single operation and accurate geometry and optical surface finish can be obtain.

Key words: slow tool servo; SPDT (single point diamond turning); array lens; freeform surface

现代光学系统设计中某些特殊的场合要求将多块光学元件精密定位成一个阵列。例如, 高功率激光焊接、镀层和热传递中广泛使用的反射式光束积分器或透射式光束积分器^[1]; 深紫外光刻机照明系统中使用的复眼反射镜阵列^[2]。传统制造方法是, 将每一个回转表面元件分别单独加工, 然后安装到同一基体上。这种做法对定位和调整技术提出了严峻挑战。如果将光学表面阵列作为一个自由曲面整体考虑, 在同一个基体上一次直接加工完成, 将大大降低安装调整的技术难度。

自由曲面光学元件加工一直是超精密制造领域的热点研究问题。目前发展起来的有自由曲面研磨 (Freeform Grinding)、微铣削 (Micro Milling)、飞刀铣削 (Raster Milling)、快刀伺服 (FTS, Fast Tool Servo) 车削以及慢刀伺服 (STS, Slow Tool Servo) 车削技术。自由曲面研磨和飞刀铣削是比较常见的加工方法, 可以获得很高的加工精度和表面质量。但是, 其加工周期长、初始对刀困难且飞刀铣削刀具回转半径以及自由曲面研磨中的研磨头半径尺寸限制了工件面形。快刀伺服车削技术使用具有高分辨率、高刚度、高动

* 收稿日期: 2009- 05- 06

基金项目: 国家部委基金资助项目 (9140A18070108KG0147)

作者简介: 关朝亮 (1981-), 男, 博士生。

态特性的辅助刀架,已应用于自由曲面和光学微结构阵列车削加工^[3-4]。但是,大多数快刀装置的行程都在 1mm 以下,限制了其加工范围。并且,滞后问题会造成跟踪性能下降^[5];主轴位置估计误差将引起加工轮廓混淆^[6]。

慢刀伺服车削技术作为光学自由曲面加工的一种方法可用于光学阵列元件加工^[7]。由于光学阵列元件表面形状的复杂性,在不同的刀具圆弧半径补偿方式下,机床运动对伺服轴的动态响应能力的要求也不相同。又因为慢刀伺服车削技术的特殊性,需要选择合适的刀具半径补偿方式,以使刀具路径适应慢刀伺服车削机床动态性能的要求,从而实现光学阵列元件慢刀伺服车削加工。

1 慢刀伺服车削技术

慢刀伺服车削典型的机床布局形式(见图 1)与普通单点金刚石车削以及快刀伺服车削加工机床布局类似。两根直线进给轴呈“T”形布局。工件主轴安装在“X”轴上。“X”轴的移动方向与工件主轴的旋转轴方向垂直。刀具安装在“Z”轴,运动方向垂直于“X”轴并与工件主轴旋转轴线平行。工件安装在主轴上并且随之一起转动,金刚石刀具按照工件不同的角度 φ 和径向位置 x 相对于工件表面运动,即刀具运动应由圆柱坐标系 (X, Φ, Z) 来描述, $z = f(x, \Phi)$ 。若面形基于笛卡尔坐标系 (X_d, Y_d, Z_d) 描述,则两套坐标系须进行转换。

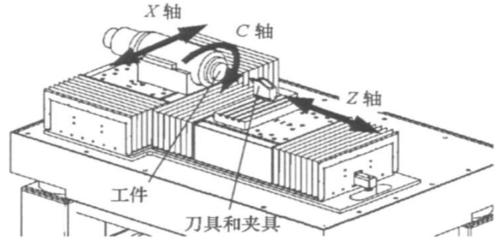


图 1 慢刀伺服机床典型配置形式
Fig. 1 Slow Tool Servo machine configuration

这种在普通超精密车削机床基础上发展起来,通过将主轴运动由速度控制改为位置控制,利用 C、X、Z 轴联动在极坐标或圆柱坐标系内实现非回转对称曲面加工的方法,由于带动刀具运动的 Z 轴最高只能达到几十赫兹,相比快刀系统几百甚至上千赫兹的运动较慢,因此称为慢刀伺服技术。

慢刀伺服加工与快刀伺服加工的不同之处在于:慢刀伺服中仅使用机床 Z 轴带动刀具运动,而不采用任何附加伺服装置。另外,慢刀伺服中主轴采用精密位置伺服控制模式(此时称为 C 轴),而在快刀伺服技术中只是将反馈元件获得的主轴位置信息供快刀伺服单元使用,并不将主轴置于位置伺服状态。慢刀伺服技术采用 C、X、Z 三轴联动的方式插补出工件表面曲线,从而完成自由曲面的加工。因此,多轴联动和插补技术是慢刀伺服技术实现的关键。

慢刀伺服的三轴联动不同于普通三轴联动数控技术。最关键的区别是慢刀伺服车削中主切削运动和轨迹运动融合。而普通的多轴(三轴或以上)联动技术一般是用于主切削运动与进给运动相互独立的铣削、磨削等加工方式的。一般来讲,为了得到较好的表面粗糙度,要求主切削运动速度尽量较高,而要求进给运动速度尽量低。慢刀伺服中主轴的旋转运动既是主切削运动又是进给运动。要保证刀具正常的车削运动条件,又要满足多轴联动的要求,所以慢刀伺服对进给轴的动态特性能要求比普通多轴联动高得多。尤其对“Z”轴来讲,即使在同一半径下仍需根据“C”轴角度位置随工件表面的起伏做往复运动。综上所述,主轴高精度位置伺服控制、直线轴往复运动高精度、高动态响应是慢刀伺服车削加工必备的关键技术条件。

2 伺服轴执行能力限制建模

伺服轴的执行能力是判断自由曲面能否使用慢刀伺服车削加工的必备条件。以 Z 轴为例,其执行能力的限制主要为行程、最大速度、最大加速度三个因素。首先假设:(1)采用液体静压导轨,摩擦力极小,故不考虑摩擦力。(2)微量切削时切削力忽略不计。(3)导轨水平布置,不需克服重力分量。导轨行程是最显而易见的限制,即伺服轴运动范围不能超过导轨的行程 L 。设伺服轴的运动轨迹为 $P(t)$,则有

$$\max P(t) - \min P(t) \leq L \quad (1)$$

为了保证机床运行安全,通常设定最高运行速度 Vel_{\max} , 即有

$$P'(t) \leqslant Vel_{\max} \quad (2)$$

伺服电机系统是物理系统, 其能量是有限的, 电机的推力不可能是无限大。一般而言, 电机会有一个峰值力矩和一个连续力矩。为了简化考虑这里认为电机超过峰值力矩就进入了非线性区, 达到了电机执行能力的极限。设移动部分总质量为 M , 直线电机峰值推力为 F_{\max} , 根据牛顿第二定律有

$$MP''(t) \leqslant F_{\max} \quad (3)$$

假设 Z 轴运动为单频正弦形式, 即 $Z(t) = A \sin(2\pi f t)$ 。其中, A 代表正弦运动幅值, f 表示正弦运动频率。分别考虑(1)、(2)、(3)式, 可获得运动幅值与正弦频率之间的限制关系, 即(4)式。

$$A \leqslant \min \left\{ L/2, \frac{Vel_{\max}}{2\pi f}, \frac{Acc_{\max}}{4\pi^2 f^2} \right\} \quad (4)$$

其中, $Acc_{\max} = F_{\max}/M$ 为最大加速度限制。

式(1)、(2)、(3)是对伺服轴限制的最基本形式, 式(4)则是对导轨行程、最高速度、最大加速度(电机最大推力)三个限制的综合。对于 Z 轴来讲, 主轴一转之内表面形状的起伏对应 Z 轴运动的幅值, 起伏次数和主轴速度则大致对应 Z 轴运动的频率。根据(4)式可初步分析自由曲面面形是否可以通过慢刀伺服车削加工。同理, 可对 X 轴、 C 轴执行能力限制建模。

3 刀具圆弧半径补偿

假设加工中使用圆弧轮廓刀具, 圆弧半径为 R , 刀具前角(Rake Angle)为零, 刀具不与被加工工件面形干涉。如图2所示, 在工件笛卡尔坐标系 $X_d Y_d Z_d$ 内分析, 刀具与工件设计面形的相对关系可以简化为在 $X_\varphi O Z_d$ 平面内刀具圆弧轮廓与剖切曲线 C_1 的相对关系。曲线 C_1 上一点 P 的单位外法线为 n_p 。曲线 C_2 为曲线 C_1 的等距曲线。

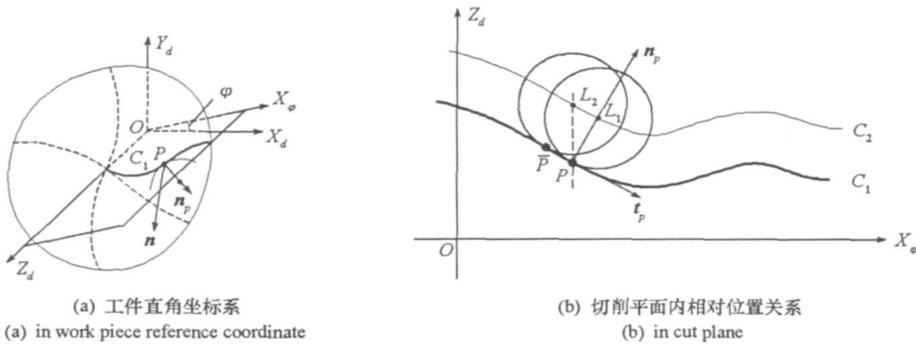


图2 刀具圆弧半径补偿示意图

Fig.2 Compensation of cut tool radius

3.1 按法线方向的半径补偿

根据刀具路径规划方法及工件表面形状可计算出刀触点 P , 按单位外法线方向 n_p 对刀具圆弧半径 R 补偿后可计算出刀位点 L_1 。

$$L_1 = P + R \cdot n_p \quad (5)$$

对于经典的自由曲面方程 $z_d = f(x_d, y_d)$, 给定 P 点处的表面外法线可通过方程的微分获得。即, $n = [-f'_x, -f'_y, 1]$ 。曲线 C_1 在 P 点处的切线 $t_p = [\cos \varphi, \sin \varphi, \alpha]$, α 的值通过 $n \cdot t_p = 0$ 来确定。 n_p 的形式为 $n_p = [\cos \varphi, \sin \varphi, \beta] / \sqrt{1 + \beta^2}$, $\beta \geqslant 0$, 其值可通过 $n_p \cdot t_p = 0$ 来确定。

由图2知, 按法线方向对刀具半径补偿要求在 X_φ (对应机床 X 轴) 方向和 Z_d (对应机床 Z 轴) 方向上同时进行补偿。因此, 随着法线方向的改变, 刀具将在 X 轴方向产生一个微小振动。光学阵列元件经常出现表面法线方向突变情况, 这时 X 轴将突然出现补偿量。又考虑到图1中机床 X 轴上装有主轴, 其动态响应能力大大受到限制, 因此可能会出现 X 轴超出执行能力范围而不能加工的情况。加工

前可以使用第2节所述方法发现这种情况。

3.2 稳定 X 轴的半径补偿

为了避免上述问题,可采用稳定 X 轴的半径补偿技术。主要思想是:将补偿量全部集中到负载较小、驱动力较大、动态响应能力相对较高的 Z 轴上。如图2(b),设 L_2 点是仅对 P 点的 Z_d 坐标补偿的刀具路径点。则有

$$L_2 = P + me_z \quad (6)$$

其中 $m \geq 0$ 为补偿量。 L_2 到曲线 C_2 的距离为 R ,即刀具圆心位于 L_2 处时刀具圆弧仍然与曲线 C_1 相切。实际上, L_2 是曲线 C_1 的等距曲线 C_2 上的一点。可使用搜索办法确定 m 值,这里不作赘述。

4 光学阵列车削实验

这里主要以一个 1×2 的凹球面阵列(图3)为例来说明光学阵列的慢刀伺服车削加工过程,并给出了其他光学阵列的加工结果。

4.1 凹球面阵列

凹球面半径 300mm,口径 18mm,中心间隔 15mm。材料选择为 6061 铝。车刀前倾角为 0° ,圆弧半径为 0.9789mm,后角为 10° 。主轴(C轴)转速选择为 120r/min,横向进给量 $10\mu\text{m/r}$,每转等角度间隔取 120 个刀触点。分别使用两种刀具半径补偿方式计算其刀具路径。

按法线方向对刀具圆弧半径进行补偿,并把得到的刀具路径分解到各伺服轴,按照第2节的方法分别对各伺服轴轨迹运行特性进行分析。为了使作图清晰,在不改变结论的前提下将横向进给量调整为 1mm/r 。由图4(a)可看出,为了加工 1×2 的凹球面阵列,主轴转一转刀具在 Z 轴方向起伏 2 次,又因为主轴 2r/s ,因此 Z 轴运动在 4Hz 处有一尖峰。从总体上看, Z 轴每个频率分量幅值都在机床 Z 轴极限运动能力之内。但是从时域上对 X 轴运动进行分析发现:行程和速度均在机床 X 轴极限能力之内,但加速度超出机床极限值 2000mm/s^2 (图4(b))。将加速度极大值出现的时刻与工件表面位置对应后证明:在凹球面光学阵列边缘与平面相交处法线方向突变,按法线方向补偿刀具半径会造成 X 轴出现极大加速度运动。按照法线方向对刀具圆弧半径进行补偿时得到的数控程序机床不能执行。

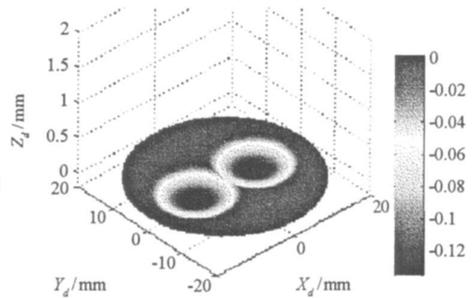
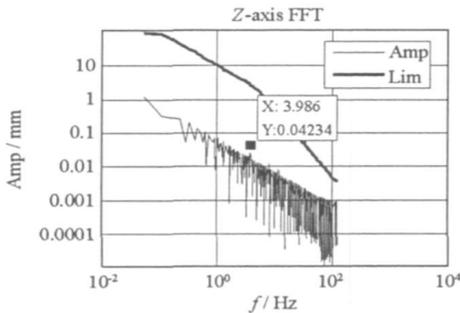
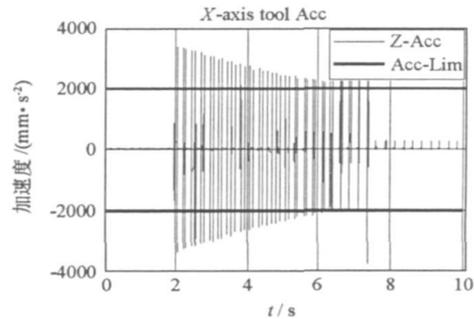


图3 光学阵列模型
Fig.3 Array lens model



(a) Z 轴运动频域分析
(a) Z axis motion analysis in frequency zone



(b) X 轴运动加速度分析
(b) acceleration analysis of X axis

图4 按法线补偿时间伺服轴运动特性分析

Fig.4 Motion analysis of machine when using normal direction compensation

按稳定 X 轴的方法对刀具圆弧半径进行补偿。由图5(a)可看出, Z 轴每个频率分量的幅值仍都在机床 Z 轴极限运动能力之内。由图5(b)可看出, X 轴运动的加速度几乎为零,使用稳定 X 轴的刀具圆

弧半径补偿方式, 有效地避免了光学阵列表面法线突变可能造成的机床 X 轴极大加速度运动。

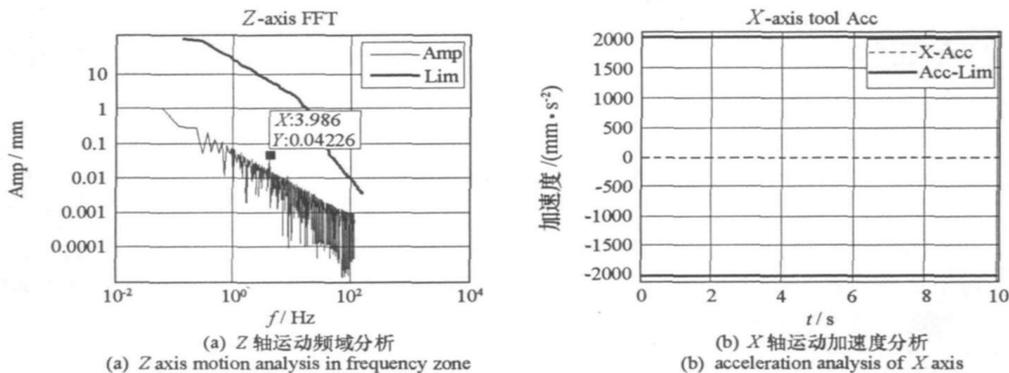


图 5 按稳定 X 轴补偿时伺服轴运动特性分析

Fig. 5 Motion analysis of machine when using keeping X steady compensation

图 6 显示了凹球面阵列的加工结果。图 6(b) 给出的是凹球面中之一的形状误差, 另一凹球面形状误差的分布和数值都与此接近。其中, 从车削中心产生的有规律的射线状误差分布是由于刀具路径生成时等角度取点造成的。从粗糙度测量结果上可以看出划痕、残留微小切屑以及车削纹路。

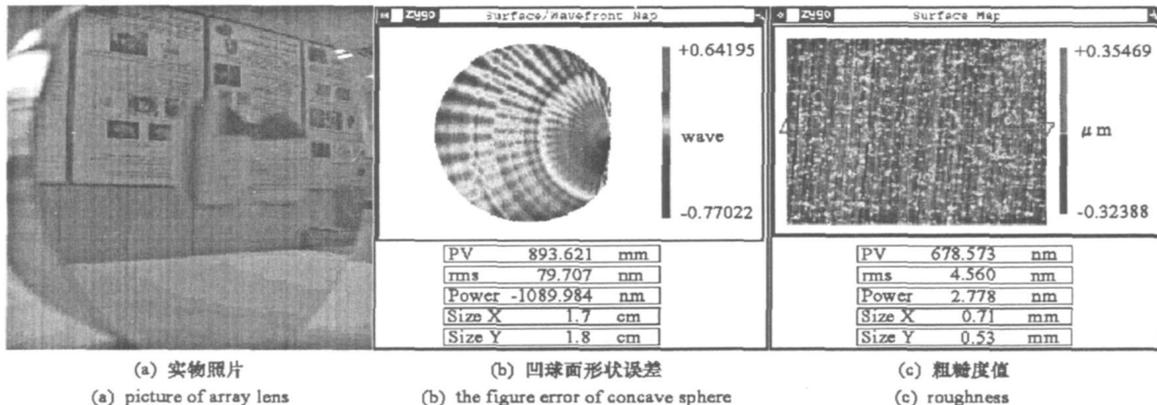


图 6 光学阵列加工结果
Fig. 6 Array lens machined by STS

4.2 其他光学阵列

图 7(a) 给出了一个 2×2 的非球面阵列加工结果。由于面形 Z 轴幅值变化较大, 在 C 轴转速为 120r/min 时接近伺服轴运动能力极限, 因此在非球面与平面交界边缘处有较大的误差。降低转速可改善这种情况, 但使加工时间增长。加工时间与工件半径尺寸成正比, 与横向进给量、C 轴转速成反比。需要综合考虑加工能力限制、加工时间和加工精度之间的关系, 限于篇幅在此不详述。

图 7(b) 给出的是二维正弦阵列加工结果。其正弦空间波长为 15mm、幅值 (PV) 30μm, 工件直径 30mm。精加工时 C 轴转速 120r/min, 横向进给量为 0.01mm, 加工时间约为 12.5min。表面粗糙度 Ra 值 5nm。

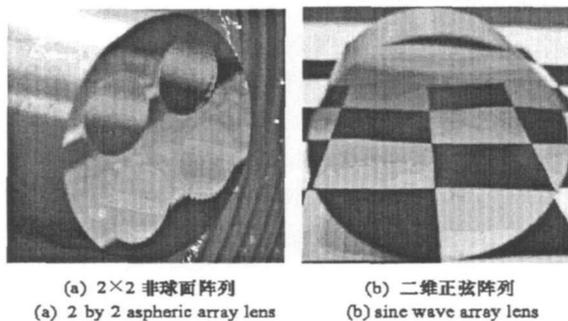


图 7 其他光学阵列
Fig. 7 Some other array lens

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 μm ,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.kineticeramics.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.