

# $F$ 数 0.42 大偏离量离轴非球面反射镜的光学加工

李锐钢

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 非球面光学元件在光学系统中的应用越来越广泛, 为了提高光学系统能量收集能力, 高陡度非球面光学元件常常被采用。然而, 高陡度非球面光学元件的光学加工至今仍是光学制造领域内的难题之一。通过一块  $F$  数 0.42 的大偏离量离轴碳化硅非球面反射镜的制造实例, 详细地介绍了一些重要的技术研究进展。首先是离轴非球面直接铣磨技术, 与传统的铣磨最接近球面相比残余误差大大减小, 估算后续光学研磨的加工周期与原来相比可以缩短 2/3 左右; 通过对非球面方程坐标变换, 大大减小了矢高差, 使数控加工难度极大降低, 而通过磨头沿非球面法线方向数控加工可以保证去除函数的对称性, 给出了详细的磨头姿态及坐标补偿求解过程。实例最终面形精度达到均方根值  $0.039\lambda$  ( $\lambda$  为  $632.8\text{ nm}$ )。

**关键词** 光学制造; 数控加工; 非球面铣磨; 坐标变换; 去除函数

**中图分类号** TH74      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/AOS201434.s122001

## Optical Manufacturing of $F$ Number of 0.42 Large-Deviation Off-Axis Aspheric Mirror

Li Ruigang

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** Aspherical components have been more and more widely used in optical systems. In order to enhance the ability of light collecting for the optical system, highly steep aspheres are often used. However, manufacturing of highly steep aspheres is now one of the hard work in optical engineering field. Through a manufacturing case of  $F$  number of 0.42 off-axis asphere with large asphericity, some researching progresses are introduced. The first is the milling technology for off-axis asphere, comparing with the traditional milling technology of the best fitting sphere (BFS), the remaining aspherical error is decreased greatly, and the following grinding cycle is shortened about 2/3; while decreasing the sag difference of the asphere by coordinate transforming of the equation, the difficulty of manufacturing is greatly reduced. Meanwhile, by making the small tool running along the asphere's normal, we can ensure the removal function's symmetry, and the solving procedure of the tool's position and coordinate's compensation is given in detail. The example shows that the final asphere precision [root-mean-square (RMS)] attains to  $0.039\lambda$  ( $\lambda$  is  $632.8\text{ nm}$ ).

**Key words** optical fabrication; numerical control machining; milling of asphere; coordinate transforming; removal function

**OCIS codes** 220.4610; 080.4228; 350.4600

### 1 引 言

在光学系统中采用非球面元件可以得到更好的像差, 同时缩小系统的体积和减小系统的重量<sup>[1]</sup>。为了提高光学系统的分辨率和成像质量, 大口径非

球面反射镜元件常常被应用于诸如天文望远镜、空间相机等光学系统中<sup>[2-5]</sup>。

一直以来非球面元件多用于同轴光学系统<sup>[6-7]</sup>, 因为同轴非球面光学元件制造技术较为简

收稿日期: 2014-02-15; 收到修改稿日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51305422)

作者简介: 李锐钢(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: liruigang@sohu.com

单,且同轴光学系统装配容易实现。相对于同轴光学系统,离轴非球面光学系统可以实现大视场、高传函、且无中心遮拦,因此离轴光学系统也开始逐渐得到广泛应用<sup>[8-9]</sup>。出于对光学系统的能量收集能力、视场角以及结构紧凑等方面的考虑,小  $F$  数高陡度的非球面光学元件常常被采用。

大口径非球面光学制造领域国际上美国、法国等国家处于领先水平<sup>[10-12]</sup>,起步也更早。国内的中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、苏州大学、国防科学技术大学、中国科学院光电技术研究所等单位也都在开展大口径非球面光学制造技术的研究<sup>[13-18]</sup>,其中中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在离轴非球面光学制造技术方面开展了长期的研究。然而,无论对国内的还是国外的科研单位来说,高陡度离轴非球面光学元件的制造,至今仍然是光学加工领域的难题之一。

本文以一块  $F$  数为 0.42 的高陡度大偏离量离轴非球面反射镜的光学制造为主线,围绕高陡度离轴非球面制造过程中的面形误差稳定收敛问题,主要探讨了以下几方面:离轴非球面直接铣磨技术快速收敛初始非球面偏差、光学研磨和抛光中通过对理论非球面进行坐标变换大大降低矢高变化率使加工和检测难度降低,而沿非球面法线方向加工的策略不但使加工稳定性更高,而且保证了去除函数的对称性,从而面形误差的收敛效率得到提高,给出了加工实例,实例中最终面形精度达到  $0.039\lambda$  ( $\lambda$  为  $632.8\text{ nm}$ )。

## 2 理论分析

某光学系统中的一块高陡度大偏离量离轴非球面反射镜,二次曲面系数为 0.24,口径为  $900\text{ mm} \times 650\text{ mm}$ ,离轴量为  $350\text{ mm}$ ,顶点曲率半径为  $1340\text{ mm}$ ,按照母镜计算等效  $F$  数为 0.42,该非球面理论面形误差如图 1 所示,矢高变化非常剧烈,矢高峰谷(PV)值达到了  $193.201\text{ mm}$ 。

非球面制造的难度可以根据下式进行估算<sup>[19]</sup>:

$$d_y = \left| \frac{8(f/D)^3}{K} \right|, \quad (1)$$

式中  $K$  为二次曲面系数,  $f$  为焦距,  $D$  为非球面元件的直径。  $d_y$  值越小,代表非球面的制造难度越大。通过表 1 的对比可以很直观地看出  $F$  数 0.42 离轴非球面反射镜的制造难度,与凯克(KECK)望远镜主镜(PM)相比,是其难度的 10 倍多。

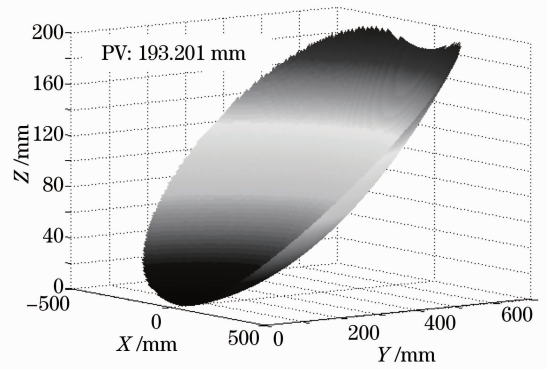


图 1  $F$  数 0.42 离轴非球面理论面形

Fig. 1 Theoretical surface of the  $F$  number of 0.42 off-axis asphere

表 1 几个非球面反射镜的难度对照

Table 1 Difficulty comparison for several aspheric mirrors

| Aspheres          | $F$ number | $K$     | $d_y$ |
|-------------------|------------|---------|-------|
| PM of EURO50      | 0.85       | -0.9994 | 4.92  |
| PM of CELT        | 1.50       | -1.525  | 17.7  |
| PM of KECK        | 1.75       | -1.644  | 26.1  |
| $F=0.42$ , mirror | 0.42       | 0.24    | 2.47  |

除了矢高变化带来的难度外,另一个更能反映非球面制造难度的指标是非球面度,即非球面偏离最接近球面的大小。非球面度越大,非球面的制造难度也就越大,图 2 是  $F$  数 0.42 离轴非球面反射镜与另外两块口径尺寸相当的非球面反射镜子午母线非球面度对比图,可以看出  $F$  数 0.42 离轴非球面反射镜的非球面度为毫米量级, PV 值达到了  $1.220\text{ mm}$ ,这在该尺寸非球面反射镜中非常罕见,并且非球面度的变化率也非常剧烈,有过非球面光学加工经验的人都会对非球面度的大变化率带来的光学加工难度有过切身体会。

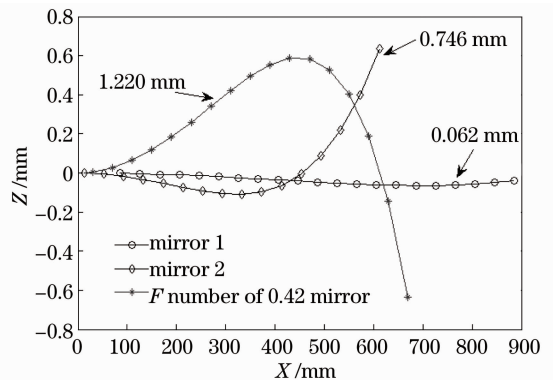


图 2 三块非球面的非球面度对比曲线

Fig. 2 Contrastive curves of asphericity for three aspheric mirrors

### 3 离轴非球面直接铣磨技术

光学元件的铣磨成形是数控加工中心采用金刚石杯状或轮状砂轮高速转动对工件表面切削去除直到达到满足要求的面形精度。对于非球面反射镜的铣磨成型,早期的工艺路线是首先由铣磨非球面最接近球面,然后进行光学研磨和抛光;近些年直接铣磨成型非球面的技术得到广泛采用,但主要针对同轴非球面。而对于离轴高陡度大偏离量非球面来说,直接铣磨成型技术仍然是其光学制造中的难点之一。离轴非球面的直接铣磨成型首先根据非球面参数(顶点曲率半径、二次项系数、高次项系数等)确定子午母线方程,输入 CAD 建模软件例如 UG 软件,通过非球面的回转对称特性建立非球面母镜;然后,对于离轴非球面的铣磨,需要根据几何轮廓参数在母镜模型中截取离轴部分,沿子午方向旋转模型使远轴点与近轴点等高,这样做为了便于铣磨时工件几何中心与加工中心转台中心重合以及更利于铣磨刀具运行轨迹的设计规划;最后根据以上建立的实体模型由后处理程序生成加工代码,加工代码控制加工中心完成非球面铣磨,不同于铣磨球面,刀具在工件上各点的进刀量根据理论值的变化而变化<sup>[20]</sup>。离轴非球面直接铣磨技术的流程见图 3,图 4 为离轴非球面直接铣磨成型的实物照片。

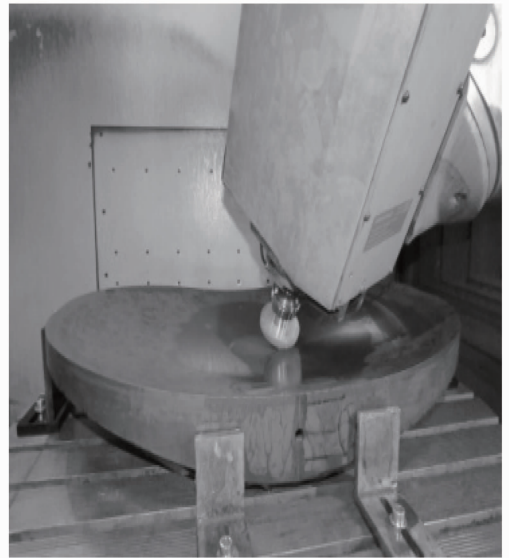


图 4 离轴非球面铣磨实物照片

Fig. 4 Photo of an off-axis asphere milling

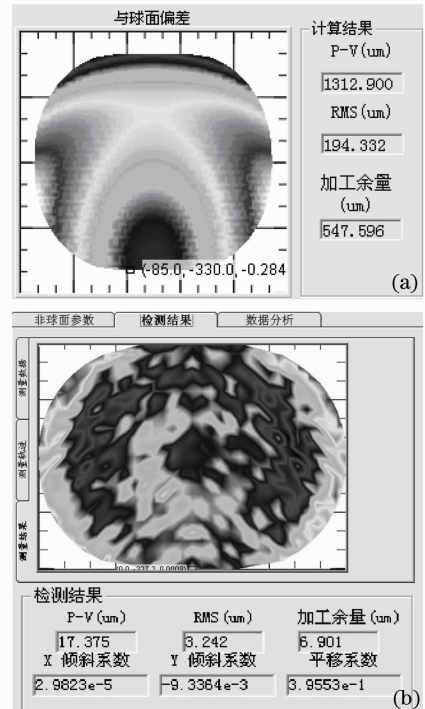


图 5 两种铣磨技术的对比。(a)铣磨最接近球面的计算结果;(b)直接铣磨离轴非球面的最终结果

Fig. 5 Comparison of two milling technologies. (a) Calculating result for milling of BFS; (b) testing result for milling of the off-axis asphere

出的按最接近球面(BFS)铣磨结果,需要后续光学研磨去除的残余误差为 PV 值为  $1312.900 \mu\text{m}$ , 均方根(RMS)值为  $194.332 \mu\text{m}$ ;图 5(b)为直接按非球面进行铣磨后的轮廓检测结果,需要后续光学研磨去除的残余误差 PV 值为  $17.375 \mu\text{m}$ , RMS 值为  $3.242 \mu\text{m}$ 。直接铣磨成形非球面后续光学研磨的工作量 PV 值减少

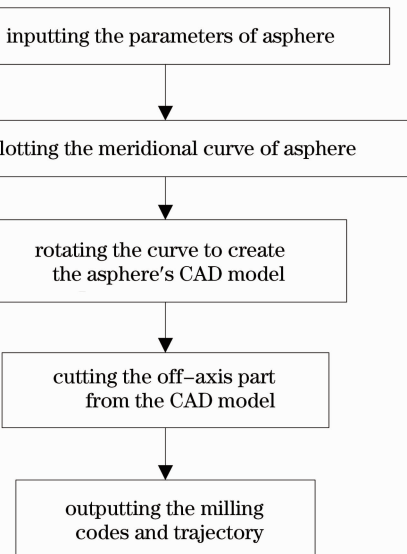


图 3 离轴非球面直接铣磨技术流程

Fig. 3 Flow diagram of the off-axis asphere milling technology

大偏离量离轴非球面的直接铣磨技术大大减少了后续光学研磨的工作量,通过  $F$  数 0.42 离轴非球面反射镜铣磨理论分析以及铣磨非球面后轮廓检测结果对比图可以很直观地看出来。图 5(a)为通过理论计算得

到 1/75。根据光学研磨的经验,估计光学研磨的周期可以从之前 13~14 周缩短到现在的 4~5 周,节省了约 2/3 的光学研磨周期。

### 4 数控光学研磨和抛光中技术问题的研究

大口径非球面反射镜光学研磨和抛光目前广泛采用的技术之一是小磨头数控加工技术即光学表面成型(CCOS)技术,图 6 为 CCOS 技术流程图。其原理为根据定量的检测结果,由计算机根据数学模型通过计算得到驻留时间分布,控制一个小工具头对非球面表面进行光学研磨或抛光,直到满足面形精度要求。

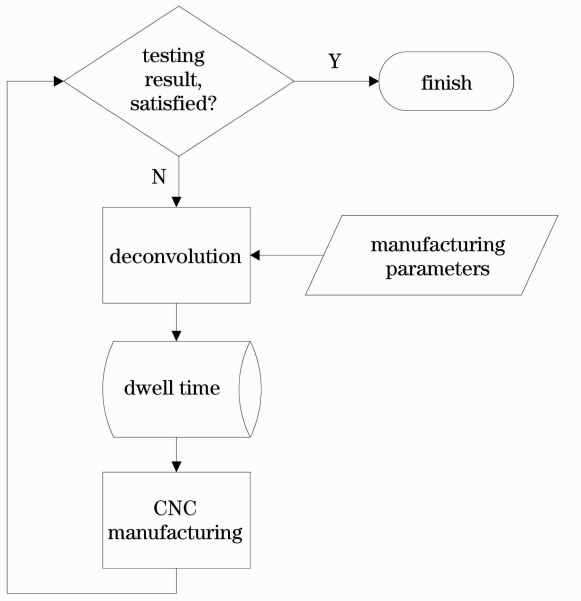


图 6 CCOS 加工技术流程图

Fig. 6 Flow diagram of CCOS technology

CCOS 技术光学研磨和抛光去除模型均符合 1927 年 Preston<sup>[21]</sup> 提出的假设:

$$\Delta Z(x, y) = kP(x, y)V(x, y), \quad (1)$$

式中  $\Delta Z(x, y)$  为磨头与工件接触区域中某点  $(x, y)$  单位时间内的材料去除量,  $P(x, y)$  为磨头与工件间的相对压力,  $V(x, y)$  为磨头与工件间的相对运动速度,  $k$  为与加工过程有关的比例常数(温度、磨头材料等)。

数控加工的过程实际上是根据磨头去除函数和面形误差分布来求解驻留时间的问题,而求解驻留时间函数的过程是一个反卷积的过程,因此去除函数对非球面数控加工中面形误差收敛具有直接影响<sup>[22]</sup>。

对于  $F$  数 0.42 的高陡度离轴非球面反射镜的光学加工,首先通过坐标变换的数学处理,降低矢高变化率,这样不仅减少了矢高剧烈变化对数控光学研磨和抛光的影响,同时大大降低了轮廓测量时定位误差对测量结果的影响(定位误差与矢高变化率正相关)<sup>[23]</sup>。图 7 为离轴非球面坐标变换示意图,首先连接离轴非球面子午母线上近轴点和远轴点作一条直线与  $x$  轴的夹角即为需要旋转的角度  $\theta$ ,并作该直线的垂直平分线与离轴非球面子午母线相交得到平移点  $(a, b)$ ,然后对非球面方程求解得到的平移点  $(a, b)$  和旋转角度  $\theta$  按坐标变换矩阵进行坐标变换,从示意图可以很清楚地看出通过坐标变换使得整个非球面的理论面形的矢高差值大大减小,这给光学加工上带来了极大的帮助。对于  $F$  数 0.42 高陡度离轴非球面反射镜来说,通过坐标变换,其理论面形的矢高差由原来的 193.201 mm 减小为 75.223 mm,矢高差减小为原来的 38.9%。

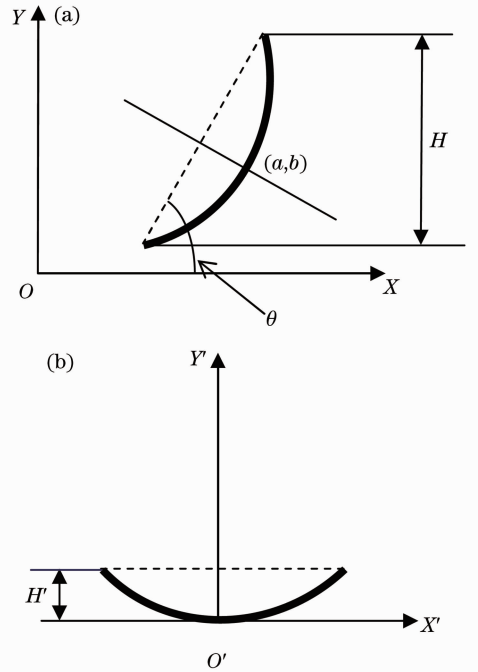


图 7 对高陡度离轴非球面进行坐标变换 (a)前、(b)后的示意图

Fig. 7 Diagram (a) before and (b) after coordinates transforming for highly steep off-axis asphere 非球面方程:

$$Z = \frac{cS^2}{1 + [1 - (K + 1)c^2S^2]^{1/2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10} + \dots, \quad (2)$$

式中  $S^2 = x^2 + y^2$ ,  $c = 1/r$ ,  $r$  为曲率半径,  $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$  为系数,  $K = -e^2$  为二次曲面常数,  $K <$

$-1$  为双曲面,  $K = -1$  为抛物面,  $-1 < K < 0$  为长椭球面,  $K = 0$  为球面,  $K > 0$  为扁椭球面。坐标变换矩阵:

$$(X' \ Y' \ Z') = [(X \ Y \ Z) - (a \ 0 \ b)] \times \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对于高陡度非球面, 如果仍然采用主轴竖直方向自转进行数控加工, 带来的问题是主轴轴线与磨头接触元件表面产生机械摩擦力的方向不正交, 从而造成主轴运行稳定性变差, 尤其在矢高变化率大的区域更加显著, 这样不仅导致去除函数分布的对称性不好, 误差收敛效率降低, 并且在极端情况下可能会存在加工中心运行安全隐患。

通过需要随时调整磨头相对非球面理论的角度保证磨头沿非球面理论面形的法线方向进行数控加工<sup>[23]</sup>, 使磨头接触元件表面产生的机械摩擦力方向与主轴轴线近似正交, 切削力得到了最有效的利用, 收敛效率较主轴竖直姿态加工大大提高, 并且主轴运行的稳定性也得到了最好的保证。沿非球面法向加工的示意图如图 8 所示, 磨头法向角度需要根据非球面方程(2)式由下式求解:

$$\theta_z = \arccos \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z'}{\partial x'}\right)^2 + \left(\frac{\partial z'}{\partial y'}\right)^2}} \right], \quad (4)$$

数控加工中心中各加工点坐标轴补偿关系为

$$\begin{cases} Z' = L \cos \theta_z + h \\ Y' = L \sin \theta_z - Y. \\ X' = X \end{cases} \quad (5)$$

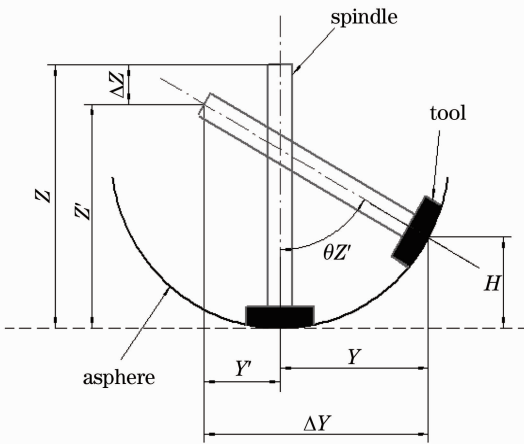


图 8 沿非球面法线加工示意图

Fig. 8 Schematic of manufacturing along normal of asphere

对  $F$  数 0.42 大偏离量离轴非球面反射镜, 应用直接铣磨非球面技术进行了非球面铣磨, 铣磨结果残余误差 PV 值为  $17.375 \mu\text{m}$ , RMS 值为  $3.242 \mu\text{m}$ 。与传统铣磨最接近球面然后光学研磨相比, 光学研磨的主要矛盾由去除大量的残余面形误差量转变为去除铣磨刀痕(刀痕经检测 PV 值约为十几个微米)和下面破坏层, 工作量显著减少, 光学研磨周期大大缩短。光学研磨和抛光阶段, 通过坐标变换降低矢高变化率和沿非球面法向加工的技术, 保证了数控光学加工的稳定性和收敛效率,  $F$  数 0.42 离轴非球面反射镜光学加工最终结果如图 9 所示, 面形精度 RMS 值达到  $0.039\lambda$  ( $\lambda$  为  $632.8 \text{ nm}$ )。

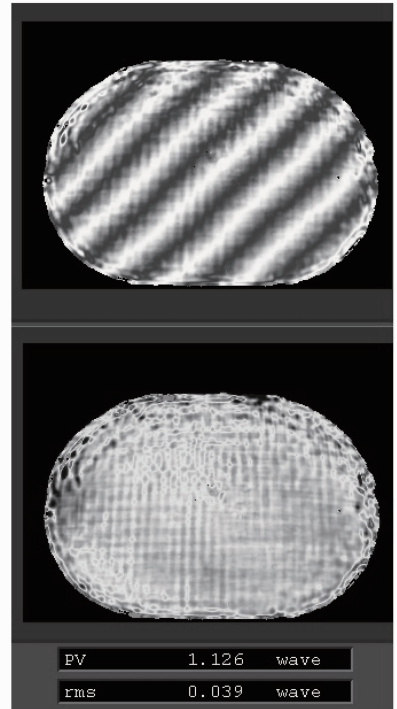


图 9 最终光学加工的结果

Fig. 9 Final result of optical manufacturing

## 5 结 论

以  $F$  数 0.42 大偏离量离轴非球面反射镜的光学制造为主要内容, 进行了非球面直接铣磨技术研究, 极大地缩短了后续光学研磨的周期; 光学研磨和抛光中, 通过坐标变换使矢高变化率降低, 同时也降低了非球面光学加工的难度; 数控光学加工中沿非球面法向进行的思路, 保证了光学加工的稳定性和面形误差的准确快速收敛。研究内容同样对其他非球面光学元件的数控光学加工具有借鉴意义。未来在高陡度大偏离量非球面光学研磨和抛光效率方面可以做更深入的研究, 固着磨料高速光学加工是可

行的选择之一。

## 参 考 文 献

- 1 J Ruckman, E M Fess, D V Gee. Recent advances in aspheric and conforml grinding at the center for optics manufacturing [C]. SPIE, 1992, 3782: 2-10.
- 2 J H Burge, H M Martin. Optical issues for giant telescopes with extremely fast primary mirrors [C]. SPIE, 2003, 4840: 226-237.
- 3 Cheng Hongtao. Design and research of the large astronomical coaxial three-mirror telescope system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522002.  
程洪涛. 共轴大型天文三反望远镜的设计研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522002.
- 4 Zhang Keke, Ruan Ningjuan, Fu Canying. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29(3): 63-69.  
张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 63-69.
- 5 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0822001.  
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0822001.
- 6 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416002.  
韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002.
- 7 Lin Jianchun, Sun Liwei, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0116001.  
林剑春, 孙丽葳, 陈博洋, 等. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0116001.
- 8 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. A new kind of three anastigmatic mirror system [C]. SPIE, 2005, 5638: 272-275.
- 9 Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2813-2820.  
薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2813-2820.
- 10 Robert A Jones, Wiktor J Rupp. Rapid optical fabrication with computer-controlled optical surfacing [J]. Opt Eng, 1991, 30(12): 1962-1968.
- 11 H M Martin, J H Burge, B Curerden, *et al.*. Manufacture of 8.4 m off-axis segments: a 1/5 scale demonstration [C]. SPIE, 2004, 5494: 62-70.
- 12 M Ferrari, S Mazzanti, G Lemaître. Fabrication of a highly variable curvature mirror: testing and results [C]. SPIE, 1995, 2576: 270-280.
- 13 Zhang Xuejun, Zhang Zhongyu, Li Zhilai. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspherical mirror [C]. SPIE, 2007, 6721: 672109.
- 14 Hui Fang, Peiji Guo, Jingchi Yu. Optimization of the material removal in fluid jet polishing [J]. Opt Eng, 2006, 45(5): 053401.
- 15 Li Shengyi, Peng Xiaoqiang. Basic theory and method of controllable compliant tools for optic elements manufacturing [J]. J Mechanical Engineering, 2013, 49(17): 1-9.  
李圣怡, 彭小强. 光学零件可控柔体制造的理论基础与方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(17): 1-9.
- 16 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *et al.*. Analysis of polishing errors by tool paths and optimization of tool paths [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0822003.  
施春燕, 袁家虎, 伍凡, 等. 运动轨迹对抛光误差的影响分析和轨迹优化研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0822003.
- 17 Wu Jianfen, Lu Zhenwu, Zhang Hongxin, *et al.*. Optimized dwell time solution for optics in ion beam figuring [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 192-197.  
武建芬, 卢振武, 张红鑫, 等. 光学元件离子束加工驻留时间优化求解[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 192-197.
- 18 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 198-205.  
戴一帆, 石峰, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 198-205.
- 19 Dae Wook Kim, Sug-Whan Kin. Novel simulation technique for efficient fabrication of 2 m class hexagonal segments for extremely large telescope primary mirrors [C]. SPIE, 2005, 5638: 48-59.
- 20 Zhang Zhiyu, Li Ruigang, Zheng Ligong, *et al.*. Precision grinding technology for the off-axis aspherical silicon carbide mirror blank [J]. J Mechanical Engineering, 2013, 49(17): 39-45.  
张志宇, 李锐钢, 郑立功, 等. 离轴非球面 SiC 反射镜的精密铣磨加工技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(17): 39-45.
- 21 F W Preston. The theory and design of plate glass polishing machines [J]. J Soc Glass Technol, 1927, 11: 214.
- 22 Wang Quandou, Liu Mincai, Zhang Hongxia. Removing function of polishing pad in computer controlled optical polishing [J]. Optical Technology, 2000, 26(1): 32-34.  
王权陡, 刘民才, 张洪霞. 数控抛光技术中抛光盘的去函数[J]. 光学技术, 2000, 26(1): 32-34.
- 23 Li Ruigang, Zheng Ligong, Zhang Feng, *et al.*. Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5): 633-639.  
李锐钢, 郑立功, 张峰, 等. 大口径高陡度离轴非球面精磨阶段的数控加工[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 633-639.

栏目编辑: 韩峰