

文章编号 1004-924X(2012)08-1669-07

应用双摆动技术加工离轴碳化硅反射镜

李俊峰, 宋淑梅*

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

摘要:研究了用双摆动技术抛光离轴非球面的工艺。介绍了用双摆动抛光加工离轴非球面的原理,分析了双摆动抛光过程中抛光盘与工件的相对运动特性及各个工艺参数对相对运动路径的影响。建立了双摆动抛光运动的数学模型,进行了计算机仿真,并对不同参数下的仿真结果进行了比较。给出了抛光模形状模型,实验验证了不同形状抛光模的材料去除特性。应用双摆动技术加工了一个224 mm×108 mm离轴碳化硅反射镜,结果显示:应用该技术加工离轴非球面镜可以有效抑制光学表面中频误差,具有较高的材料去除效率,面形精度可以稳定达到 $\lambda/30$ (rms, @633 nm)。因此,双摆动抛光技术的研究有助于推动离轴非球面制造技术的发展。

关键词:碳化硅反射镜;离轴非球面;双摆动技术;光学加工

中图分类号:TH703;TN305.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1669

Manufacture of SiC off-axis aspheric mirrors by double-swing method

LI Jun-feng, SONG Shu-mei*

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

* Corresponding author, E-mail: smsong@ciomp.ac.cn

Abstract: The polishing principle of Double-Swing Method (DSM) was introduced, the relative movement characteristic between polishing lap and workpiece was analyzed, and the influence of polishing parameters on the relative movement was discussed. A mathematical model of the DSM in a movement state was established and its movement was simulated in a programming language. Then, simulation effects under different parameters was compared. The shape model of the polishing lap was presented, and the material removal character of the polishing lap with different shapes was verified. Finally, a rectangle off-axis aspheric mirror in a size of 224 mm×108 mm was polished by the DSM. The experiment result shows that to manufacture the off-axis aspheric mirror by the DSM can control the middle-frequency error and can obtain high working efficiency, and the surface precision is about $\lambda/30$ (rms, @633nm). Therefore, the DSM benefits the development of the manufacture technique for off-axis aspheric mirrors.

Key words: SiC mirror; off-axis asphere mirror; double-swing method; optical manufacture

收稿日期:2012-03-21;修订日期:2012-04-17.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z113);科技部国际合作项目(No. 2011DFA50590)

1 引言

离轴二次非球面光学系统具有结构简单、成像质量高、尺寸小和质量轻等优点,而且还可以避免光学系统的遮拦问题。离轴三反消像散型结构光学系统在设计上使用了 3 块离轴非球面反射镜,这种结构可同时实现对地观测遥感器的大视场、高分辨率并具有较小的体积和质量,因而,离轴非球面在天文仪器和空间光学系统中得到了广泛的应用。但是,离轴非球面光学元件的研制也是该结构相机技术的难点之一^[1-5]。

随着先进光学制造、数控等技术的不断发展,近年来非球面的加工技术也有了长足的进步,与其相适应的高精度 CNC 加工系统已经成为了现代光学加工的主要技术装备之一,高精度、智能化已经成为现代非球面光学加工的一个技术特点。离轴非球面的加工主要有计算机控制光学表面成形技术,应力盘抛光技术,以及双摆动抛光技术等。双摆动抛光技术是由中科院长春光机所首创的用于离轴非球面加工的工艺方法,该项技术具有低成本、高精度的特点^[6],其加工机床的设计已于 2009 年获得了国家发明专利。

由于碳化硅材料具有比刚度大,热膨胀系数小,机械性能稳定等优点,越来越多地被应用到航天、航空光学系统中^[7]。本文针对 224 mm×108 mm 矩形离轴碳化硅反射镜的加工过程,讨论了双摆动法加工离轴非球面的主要技术。

2 非球面参数

对于以 z 轴为旋转轴形成的非球面光学表面,一般可以采用下面的方程来描述:

$$z = \frac{cs^2}{1 + [1 - (k+1)c^2s^2]^{1/2}} + A_1s^4 + A_2s^6 + A_3s^8 + A_4s^{10} + \dots, \quad (1)$$

其中: $s^2 = x^2 + y^2$; $c = 1/r$, r 为非球面顶点曲率半径; k 为二次项系数; A_1, A_2, A_3, A_4 为非球面高次项系数。

离轴非球面作为同轴非球面的一部分,其结构如图 1 所示。 b 为离轴非球面的离轴量, φ 为非

球面的离轴角, D 为离轴非球面的口径, O 点为离轴非球面母镜的中心, B 为离轴非球面中心, P_1, P_2 分别是距母镜中心最远和最近的 2 个点。

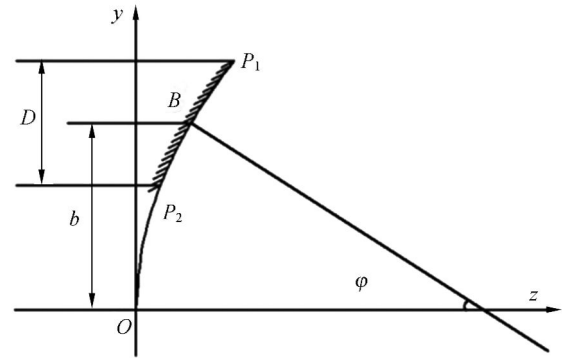


图 1 离轴非球面参数

Fig. 1 Parameters of off-axis aspheric

3 双摆动抛光技术

3.1 双摆动抛光工艺原理及结构

双摆动抛光技术 (Double-swing method, DSM) 是基于经典的修带抛光技术发展而来,针对离轴非球面的一种加工工艺方法。双摆动抛光机床由摆臂机构和精密转台两部分组成,摆臂由四连杆机构组成,电机驱动可绕轴 O_1 往复摆动,转台则由伺服电机驱动可绕轴 O_2 数控旋转或往复运动,双摆动抛光的原理图如图 2 所示。

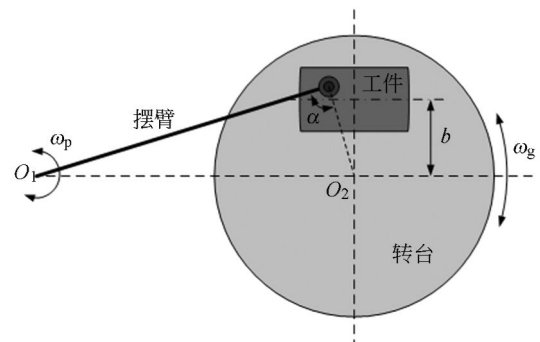


图 2 双摆动抛光原理图

Fig. 2 Polishing principle of Double-Swing Method (DSM)

当对离轴非球面进行加工时,根据离轴非球面的离轴量将工件置于距转台中心距离为 b 的离轴位置上,使得非球面的加工位置与使用位置相一致。摆臂的摆动速度为 ω_p ,转台转速为 ω_g , b

为非球面的离轴量, O_1, O_2 分别为摆臂和转台的旋转中心, 摆臂与摆臂抛光头在转台上的径向的夹角为 α 。

3.2 双摆动抛光的相对运动分析

双摆动抛光的运动分析如图 3 所示, 摆臂旋转所在的坐标系为 $X_1O_1Y_1$, 转台所在的坐标系为 $X_2O_2Y_2$, 工件坐标系为 $X_gO_2Y_g$, 抛光盘距转台中心的距离为 r , O_1 与 O_2 之间的距离为 L 。

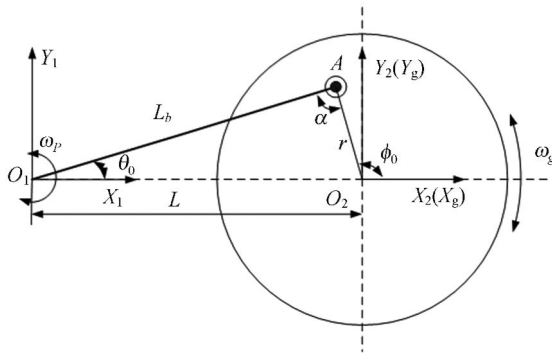


图 3 双摆动运动分析图

Fig. 3 Movement analysis for DSM

根据坐标转换可以得到从坐标系 $X_1O_1Y_1$ 到坐标系 $X_2O_2Y_2$ 的转换方程:

$$\begin{cases} X_2 = X_1 - L \\ Y_2 = Y_1 \end{cases} \quad (2)$$

抛光盘 A 在坐标系 $X_1O_1Y_1$ 下的位置方程可以表示为:

$$\begin{cases} x_{A1} = L_b \cos \theta \\ y_{A1} = L_b \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

其中: $L_b = r \cos \alpha + \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2 \alpha}$, α 为摆臂与转台径向的夹角, $\theta = \omega_p t + \theta_0$, θ_0 为摆臂的初始角度位置。

通过坐标转换可以得到抛光盘 A 在工件坐标系 $X_gO_2Y_g$ 下的位置方程:

$$\begin{cases} x = x_{A1} \cos \phi + y_{A1} \sin \phi - L \cos \phi \\ y = -x_{A1} \sin \phi + y_{A1} \cos \phi + L \sin \phi \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\phi = \omega_g t + \phi_0$, ϕ_0 为工件的初始角度位置。

3.3 双摆动抛光参数分析

在双摆动加工工艺中, 不仅抛光盘与工件之间的相对运动特性影响加工效果, 而且抛光模的形状作为双摆动抛光的一个工艺参数, 对加工结果也有影响。下面主要针对抛光盘运动路径、抛光模形状及驻留时间等参数, 分析其对双摆动加工的影响。

3.3.1 抛光盘运动路径影响分析

根据 3.2 节中的双摆动抛光相对运动分析可知: 抛光盘与工件的相对运动轨迹不仅与摆臂和工件的摆幅有关, 而且也与摆臂摆速 ω_p 、转台转速 ω_g 及夹角 α 值相关。

本文应用 Matlab 仿真软件分析运动路径与各个参数之间的关系, 从而确定加工的最佳工艺参数。根据分析得出, 摆臂与工件的摆幅只决定了工件被加工的区域范围, 或者说由所加工位置的误差分布形态来决定双摆动工艺中的摆臂与工件的摆幅; 而运动路径则由摆臂与摆臂抛光头在转台上的径向夹角 α 和转速比 $K = \omega_p / \omega_g$ 共同决定。

3.3.1.1 夹角 α 的确定

假设抛光盘与工件之间的转速比相同, 那么根据 3.2 节中推导出的数学模型, 通过仿真可以得到夹角 α 值不同情况下的抛光盘运动路径曲线, 仿真结果如图 4 所示。

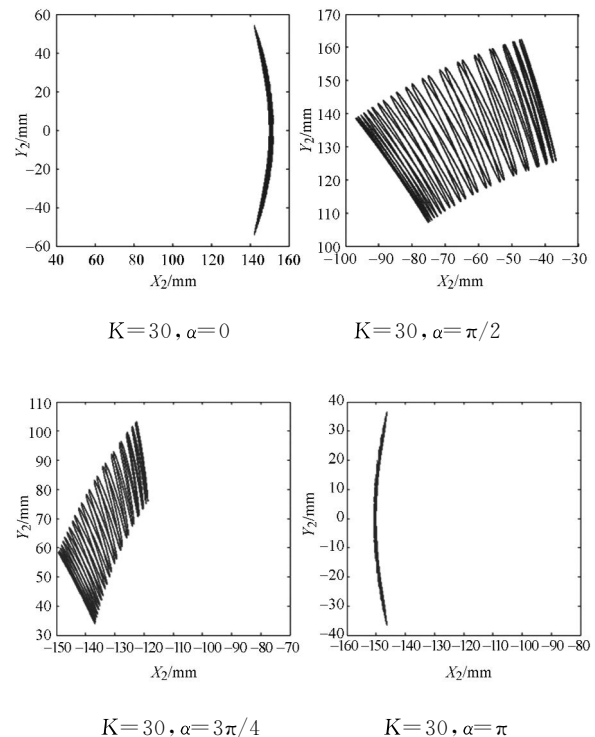


图 4 相同值, 不同值的运动轨迹曲线

Fig. 4 Simulation graphics with same K but different α

从图 4 的仿真结果中可以看出, 当 $\alpha = \pi/2$ 时, 抛光盘在工件的某一环带上沿工件的径向做往复摆动。因此, 在加工过程中, 一般选择抛光盘与工件的径向夹角 $\alpha = \pi/2$, 或者接近于 $\pi/2$, 这样

的加工有别于传统的定点环带抛光,双摆动抛光可以使抛光盘在某一环带上做小幅径向往复摆动,同时工件做绕轴的往复旋转,这样的运动可以有效地抑制光学表面产生中频误差。

3.3.1.2 转速比 K 的确定

当摆臂与摆臂抛光头在转台上的径向夹角 α 确定,即 $\alpha = \pi/2$,则不同转速比情况下的抛光盘运动路径的仿真结果如图 5 所示。

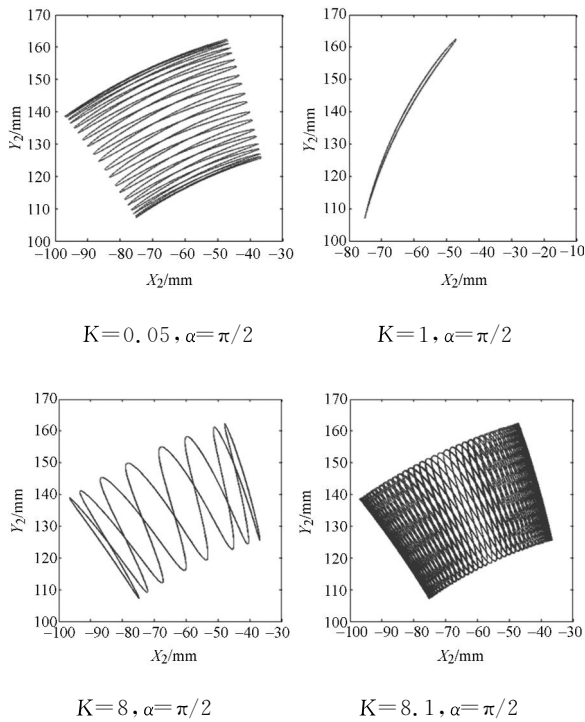


图 5 相同 α 值,不同 K 值的运动轨迹曲线

Fig. 5 Simulation graphics with same α but different K

从图 5 的仿真结果可以看出,当 $K < 1$ 时,抛光头轨迹沿着工件的近似切向;当 $K > 1$ 时,抛光头轨迹沿着工件的近似径向,且 K 越大越接近径向。对于工件来说,每个环带上的误差是相等的。根据抛光盘的材料去除特性及误差形态可知:当抛光头的运动轨迹越接近径向运动,其材料去除效率越高,同时也可以得到更光滑的表面,有效抑制光学表面的中频误差。在加工中,应使转速比参数 $K > 1$,但是 K 值不能为整数,因为当 K 值为整数时每个运动周期内的轨迹重合,这样使被加工区域的材料去除不均匀,容易形成麻花面,产生像散误差。因此,根据面形检测结果中不同的误差分布形态,选择不同的转速比值,可获得不同的抛光盘运动路径,并且在设定转速比参数 K 值时,应使 $K > 1$ 且不能为整数。

3.3.2 抛光模形状影响分析

抛光模形状也是影响双摆动抛光工艺的参数之一。在相同的运动模式下,不同形状的抛光模的材料去除特性不同,因此,根据被加工光学元件的面形误差分布形态,所选择的抛光模形状也有所不同。在加工中,最常用的抛光模形状有圆形、菱形、花瓣等,如图 6 所示。一般情况下,抛光模的形状可以用公式(5)表示,即:

$$\frac{|x|^m}{|a|^m} + \frac{|y|^n}{|b|^n} \leq 1, \quad (5)$$

其中, a 和 b 分别为抛光模半轴长度, m 和 n 为抛光模形状因子,决定了抛光模的形状。

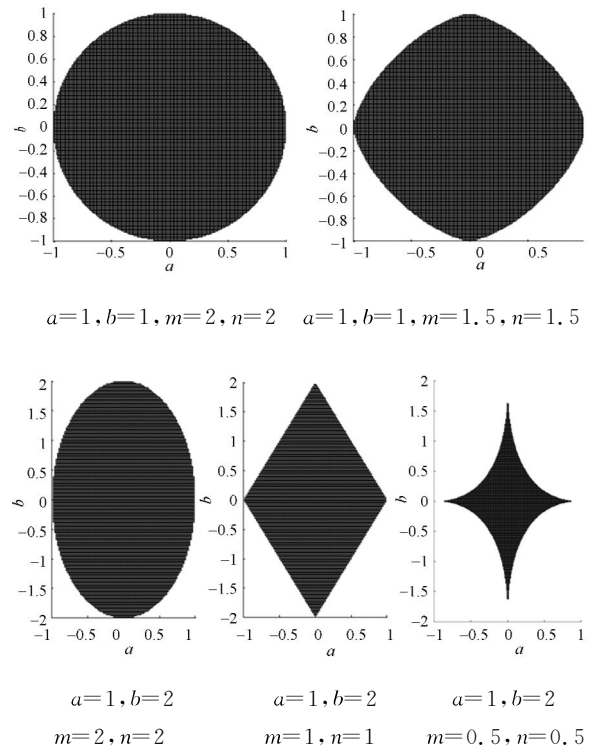


图 6 常用抛光模形状

Fig. 6 Known shape of polishing laps

在双摆动加工中,由于不同形状的抛光模与被加工光学元件相接触的材料去除函数特性不同,这样就增强了该种方法的工艺参数选择能力。因此,可以根据光学表面不同类型的的面形误差,选择合适的抛光模参数。

3.3.3 抛光盘驻留时间分析

假设抛光盘在整个抛光区域内具有相同的去除函数 $R(x, y)$,抛光盘在位置 (x, y) 处的驻留时间为 $D(x, y)$,那么元件的材料去除量 $Z(x, y)$ 可表示为:

$$Z(x, y) = R(x, y) * * D(x, y), \quad (6)$$

其中, * * 表示二维空间卷积。

在数控光学加工中,由于被加工光学表面每一处的材料去除量都不同,在抛光盘的材料去除函数已知的情况下,只要控制驻留时间就可以达到预定的材料去除量^[8-10]。在双摆动抛光技术中,通过控制工件主轴的摆动速度来确定驻留时间的长短。如图 7 所示,由于被加工环带误差分布的不同,可以把被加工区域分成几段,通过主轴数控系统使每一段的主轴摆动速度不同,从而使抛光盘在每个区域的驻留时间不同,材料去除量亦不同。具体的转速数值要根据检测的面形误差分布形态及相关优化软件来确定。

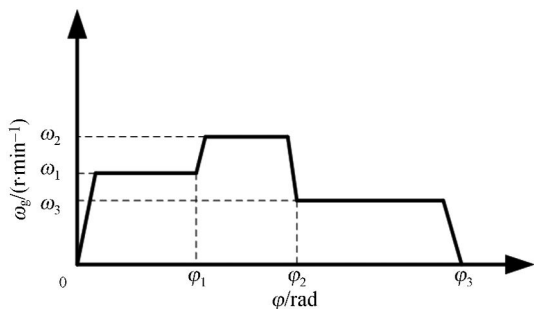


图 7 双摆动主轴转速变化曲线
Fig. 7 Mainshaft speed of DSM

4 实验验证及数据分析

应用双摆动加工机床,对一个口径为 Φ240 mm 的圆形实验件进行抛光实验,验证各个抛光参数对抛光结果的影响,其加工的实物如图 8 所示。

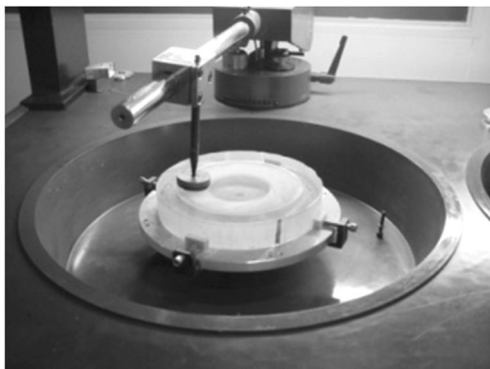
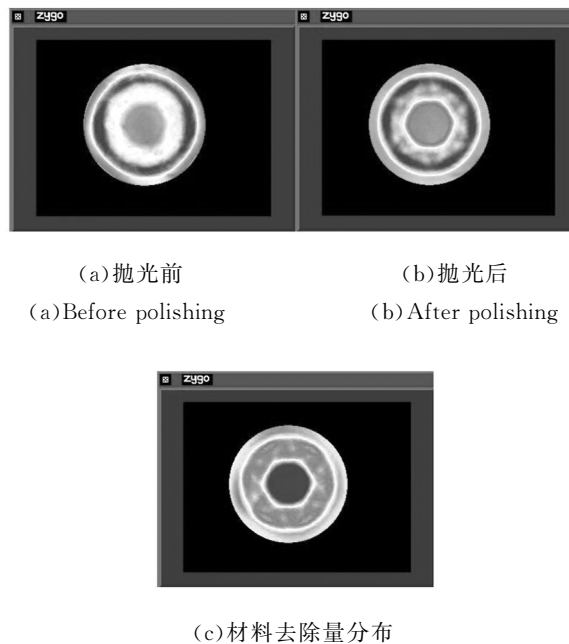


图 8 抛光实验
Fig. 8 Polishing experiment

4.1 转速比 K 实验验证

双摆动技术加工时,根据理论分析其转速比设定应大于 1 且不能为整数,若为整数则可能出现麻花面,产生像散误差等,因此在加工试验中选定一整数作为实验参数,从而验证仿真结果的正确性,图 9 为设定转速比 K=8 时抛光后面形误差的检测结果。



(a) 抛光前 (a) Before polishing
(b) 抛光后 (b) After polishing

(c) 材料去除量分布 (c) Distribution of polished material

图 9 面形误差检测结果
Fig. 9 Results of surface error test

从图 9 的检测结果中可以看出,当转速比 K 为整数时,每个运动周期内的运动轨迹重合,这样导致被加工环带内出现死点,使整个环带内的加工不均匀,这种现象在加工中应避免,因此,在设定转速比 K 时,不应使其为整数。


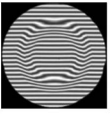
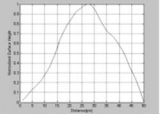
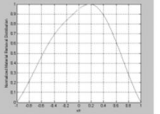

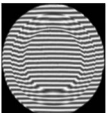
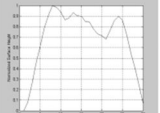
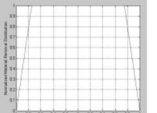

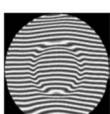
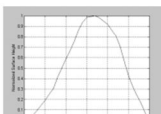
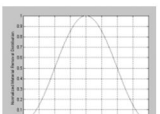
4.2 不同形状抛光模加工实验

光学加工,尤其是非球面加工中,根据面形误差选择不同形状的抛光模是比较常用的工艺方法。掌握不同形状抛光模的材料去除特性有助于光学元件的加工。现应用圆形、正方形及菱形三种形状的抛光模进行抛光实验。

在其它各项参数均相同的情况下,抛光模的形状对材料去除量具有较大的影响,不同形状抛光模的加工效果如表 1 所示。

表 1 不同形状抛光模抛光实验数据

Tab.1 Polishing experiment results for different shapes of laps

抛光模形状	干涉条纹	实测加工区域截面曲线	理论仿真结果
			
			
			

通过抛光实验得到:不同形状的抛光模具有不同的材料去除函数,且理论仿真与实验检测结果一致,从而验证了仿真结果的正确性。因此,可以把抛光盘的形状作为一个抛光参数以控制抛光效果。通过仿真可知,若误差形态分布呈高斯状或近高斯状,可以选择圆形或菱形抛光盘并结合其它抛光参数对误差进行修正;若误差形态分布具有一定带宽的等幅值误差,则可以选择方形的抛光模对误差进行修正。

5 工程应用

5.1 工程实例

应用双摆动抛光技术加工一个 $224 \text{ mm} \times 108 \text{ mm}$ 矩形离轴 SiC 反射镜,其实物如图 10 所示。该非球面顶点半径 $R=670 \text{ mm}$, $k=-0.8$, 离轴量 $b=69 \text{ mm}$,其最大非球面度为 0.054 mm ,非球面度分布如图 11 所示。

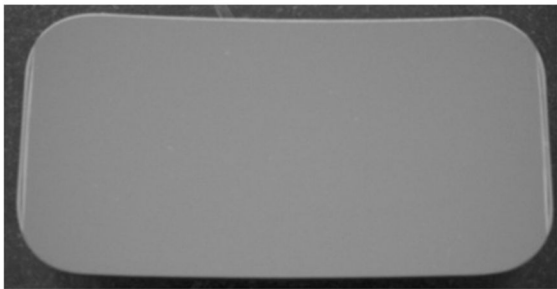


图 10 离轴非球面镜

Fig. 10 Off-axis aspheric mirror

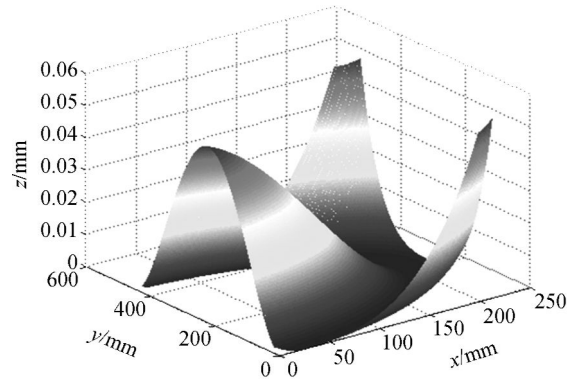


图 11 非球面度分布

Fig. 11 Asphericity distribution

5.2 结果及数据分析

应用双摆动加工技术加工该矩形离轴非球面镜,在加工中进行了多次参数调整及面形检测,得到的面形精度约为 $\lambda/30(\text{rms}, @633 \text{ nm})$,图 12 为应用该项技术加工得到的面形检测结果。

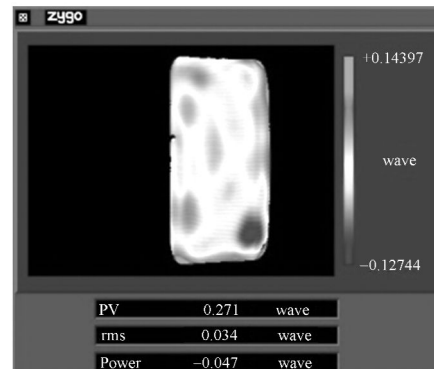


图 12 应用双摆动技术的检测结果

Fig. 12 Surface error with DSM

通过理论与实验综合分析可得出:应用双摆动加工离轴非球面镜,面形精度可以稳定地达到 $\lambda/30(\text{rms}, @633 \text{ nm})$;应用该项技术对离轴非球面进行加工,不仅具有较高的材料去除效率,而且被加工的表面具有较好的中频误差特征。

6 结论

本文研究了双摆动加工离轴非球面的工艺方法,分析了双摆动加工中抛光盘的运动路径及各个参数对运动路径的影响,并通过实验验证了不同形状抛光模的材料去除特性。双摆动加工技术是一种从经典加工工艺演变得到,针对离轴非球面的加工工艺方法。目前,应用双摆动加工技术

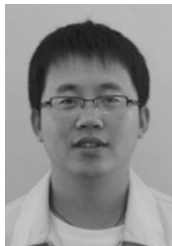
已完成了多块参数不同的非球面的加工。工程任务的完成情况表明,应用双摆动加工技术加工离轴非球面,面形精度可以稳定达到 $\lambda/30$ (rms, @

633 nm)水平,具有较高的去除效率,并可以获得很好的表面特征。因此,该项技术的研究对离轴非球面加工技术的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 郑立功,张学军,张峰. 矩形离轴非球面的数控加工[J]. 光学精密工程,2004,12(1):113-117.
ZHENG L G, ZHANG X J, ZHANG F. NC surfacing of two off-axis aspheric mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1):113-117. (in Chinese)
- [2] 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.
LI R G, ZHENG L G, ZHANG F, *et al.*. Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):633-639. (in Chinese)
- [3] 欧阳渺安. 超精密非球面镜面模具直轴磨削的研究[J]. 光学精密工程,2006,14(4):545-552.
OUYANG M A. Study of ultra-precision vertical grinding for aspheric lens mould[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):545-552. (in Chinese)
- [4] 王贵林. SiC 光学材料超精密研抛关键技术研究[D]. 北京:中国科学院,2002.
WANG G L. *A study on key techniques in ultra-precision lapping and polishing for optical SiC materials* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [5] 程灏波,张学军,郑立功,等. 离轴非球面加工、检测轨迹优化研究[J]. 光学技术,2003,29(2):247-249.
CHENG H B, ZHANG X J, ZHENG L G, *et al.*. Optimizing the moving-orbit for off-axis aspheric manufacturing and test [J]. *Optical Technique*, 2003,29(2):247-249. (in Chinese)
- [6] WANG P, LI J F, XUAN B, *et al.*. Double-swing method used for polishing off-axis aspherical mirrors[J]. *SPIE*, 2009,7282:728203.
- [7] 赵文兴,张舸,赵汝成,等. 轻型碳化硅质反射镜坯体的制造工艺[J]. 光学精密工程,2011,19(11):2609-2617.
ZHAO W X, ZHANG G, ZHAO R CH, *et al.*. Fabrication of silicon carbide lightweight mirror blank[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2609-2617. (in Chinese)
- [8] 邓伟杰,郑立功,史亚莉,等. 离轴非球面抛光路径的自适应规划[J]. 光学精密工程,2009,17(1):65-71.
DENG W J, ZHENG L G, SHI Y L, *et al.*. Adaptive programming algorithm for generating polishing tool-path in computer controlled optical surfacing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):65-71. (in Chinese)
- [9] KIM D W, KIM S W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes[J]. *Optics Express*, 2005, 13(3):910-917.
- [10] SONG C, WALKER D, YU G Y. Misfit of rigid tools and interferometer subapertures on off-axis aspheric mirror segments [J]. *Optics Engineering*, 2011,50(7):073401.

作者简介:



李俊峰(1980—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2005年于长春理工大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径非球面多模式组合加工技术的研究。E-mail: ljf220@sohu.com



宋淑梅(1963—),女,吉林人,研究员,硕士生导师,主要从事大口径非球面先进加工与检测技术方面的研究。E-mail: smsong@ciomp.ac.cn