

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0044-04

离轴非球面数控小工具加工模型

汉语^{1,2} 伍凡¹ 万勇建¹ 房凯¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 数控小工具加工技术是目前中等口径(直径小于 500 mm)离轴非球面光学元件的主要加工方法之一。数控小工具加工模型建立在普林斯顿假设基础之上,通过计算机控制小工具在工件表面的驻留时间及其他参数来实现工件表面材料的精确去除。结合实际加工中存在的问题,分析了最接近球面的合理确定方法;建立了以离轴非球面弧矢面等高线为加工轨迹的数控模型,有效地减少了小工具加工所带来的不规则“碎带”,并将二维驻留时间运算简化为一维;结合常量-线性分布模型对边缘效应进行了有效处理。利用仿真程序对 $\phi 124$ mm 离轴抛物面镜进行了模拟加工,模拟结果表明,在该模型的指导下,离轴抛物面镜面型误差均方根值从 0.018 mm 减小至小于 $\lambda/60$ ($\lambda=632.8$ nm)。

关键词 光学加工;离轴非球面;小工具;边缘效应

中图分类号 TH161⁺.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s20.0044

Manufacturing Model Research of Computer Controlled Optical Surfacing Technology for Off-Axis Aspheric Mirrors

Han Yu^{1,2} Wu Fan¹ Wan Yongjian¹ Fang Kai¹

(¹ *The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*)
(² *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract Computer controlled optical surfacing (CCOS) technology is a common method to fabricate off-axis aspheric mirrors, whose diameters are less than 500 mm. CCOS technology is based on Preston hypothesis. It uses a small lap which travels over the workpiece surface. By accurately controlling the dwell time and other parameters, a prescribed amount of material can be removed at each point on the surface. Considering the problem in the process of manufacturing, a best fit sphere is chosen reasonably. A computer controlled model is found, which tool path is along the contour line of sagittal surface of the off-axis aspheric mirror. The two dimensional convolution operation is reduced to one dimensional convolution. The constant-linear pressure distribution model is used to analyze the edge effect. The manufacture process of a $\phi 124$ mm off-axis aspheric mirror has been simulated. The result shows that under the direction of the model, the root mean square of its surface figure error decreases from 0.018mm to $\lambda/60$ ($\lambda=632.8$ nm).

Key words optical fabrication; off-axis aspheric mirrors; small lap; edge effect

1 引言

离轴非球面作为一种特殊的光学元件广泛应用于大口径地基、空间望远系统,目标瞄准系统、红外光谱分析等系统之中。在系统中采用离轴非球面,不仅可以有效矫正像差,还可以最大程度地降低系统重量,简化系统结构,减少加工成本。

离轴非球面的特殊之处在于镜面的几何轴线与光轴不重合,镜面旋转不对称。众所周知,旋转对称性对光学加工具有极其重要的意义,球面镜由于存在无数旋转对称轴,因此加工时可以采用对研的方法;二次非球面镜仅有一条旋转对称轴-光轴,这给加工带来了很大困难,但仍可以利用光轴的旋转对

基金项目: 国家自然科学基金(60808017)资助课题。

作者简介: 汉语(1980—),男,博士研究生,主要从事先进光学制造和检测技术等方面的研究。

E-mail: ccgj00311222@yahoo.com.cn

导师简介: 伍凡(1957—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造和检测技术等方面的研究。

E-mail: wufan@ioe.ac.cn

称性,采用环带研抛的方法进行加工;离轴非球面几何轴与光轴不重合,无法利用上述方法加工^[1,2]。

数控小工具加工技术是目前离轴非球面加工的主要手段之一。它利用计算机控制一个比被加工工件小得多的研磨头或抛光头在工件表面上移动,通过控制磨头与工件间的相对运动速度、压力以及磨头在表面某一区域的停留时间实现对材料去除量的精确控制,该技术具有高效率、高精度、不受面形误差分布影响等优点,尤其适合离轴非球面的加工。数控小工具技术的基本原理在很多文献中都有详细的介绍^[3~7],在此不再赘述。本文从实际加工的角度出发,详细介绍了离轴非球面最接近球面的选择方法、加工轨迹的确定方法以及边缘效应的处理模型,这些构成了一个完整的离轴非球面数控加工模型。

2 最接近球面的选择

最接近球面半径以及非球面度计算按照不同的定义方式,有着不同的计算方法。最常用的有作为轴对称非球面的一部分和以离轴镜面中心为坐标原点计算两种方法。单从所求得的非球面度的大小考虑,以离轴镜面中心为坐标原点计算的方法通常会略好于前一种计算方法,但是在实际加工过程中,由于该方法所确定的面形误差关于子午面不对称,加工过程中产生大量无规律的碎带,给面形的检测带来很大困难。作为轴对称非球面的一部分来确定最接近球面以及非球面度,面形误差在弧矢面等高线上相等,以等高线为加工轨迹,可以使中频误差(碎带)的分布具有一定的规律性,便于平滑处理。因此文中采用作为轴对称非球面的一部分的方法来计算最接近球面^[8~10]。令离轴非球面子午截面两个边缘点分别为 $p_1(x_1, y_1)$ 和 $p_2(x_2, y_2)$,最接近球面球心坐标为 $(0, c)$,最接近球面半径为 R ,则有

$$c = \frac{(x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2)}{2(x_1 - x_2)}, \quad (1)$$

$$R = \sqrt{(x_1 - c)^2 + y_1^2}. \quad (2)$$

3 加工轨迹的确定方法

按照作为轴对称非球面的一部分来计算得到的非球面度在弧矢方向等高线上关于子午面对称,将其作为磨头加工轨迹,不仅可以减少加工中带来的碎带,还可以将复杂的二维驻留时间计算简化为一维,大大缩短了运算时间。

在母镜坐标系 xy_z 内,弧矢方向等高线上的点

可由下式确定

$$y^2 + z^2 = r^2, \quad y \in [y_0, r], \quad z \in [-z_0, z_0], \quad (3)$$

式中 $y_0 = \frac{N_{\text{OAD}}^2 - D^2/4 + r^2}{2N_{\text{OAD}}}$; N_{OAD} 为离轴量; r 为任意环带的半径; D 为离轴非球面的口径。

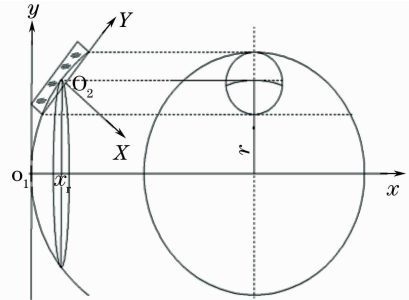


图1 加工轨迹(沿弧矢面等高线分布)

Fig.1 Tool path (along contours of sagittal)

转换到工件坐标系 XYZ 中有

$$\begin{cases} X = x_r \cos \theta - y \sin \theta - a \cos \theta + b \sin \theta \\ Y = x_r \sin \theta + y \cos \theta - a \sin \theta - b \cos \theta \\ Z = z \end{cases} \quad (4)$$

其中 x_r 为 A 在 x 轴上的坐标值, a, b 为 O_2 点在 $x_{O_1}y$ 坐标中的坐标, θ 为 $x_{O_1}y$ 与 XO_2Y 之间的偏转角。

4 边缘效应处理

边缘效应问题是光学加工中无法回避的难题之一。边缘效应的处理方法有附加套圈法和应力分析法两种,其中附加套圈法在套圈和工件粘接过程中会导致工件表面产生应力变形,因而一般不被采用。应力分析法目前所采用的应力分布模型通常为表层分布模型,其应力分布如图2所示。为了确定磨盘在漏边时的应力分布情况,利用有限元分析软件对磨盘在不同位置时的受力情况进行模拟,模拟结果(见图3)表明,磨盘在靠近工件边缘一侧的压力并非如表层分布模型中所表述的那样为一突变的常量,而是呈线性分布,因此为了更加准确地描述磨盘的应力分布状况,采用常量-线性分布模型对边缘效

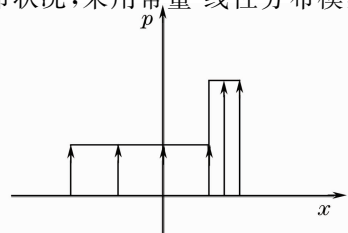


图2 表层模型的应力分布

Fig.2 Pressure distribution of skin model

应进行处理。该模型将磨盘分为两个区域:常量区和线性增长区,如图 4 所示。

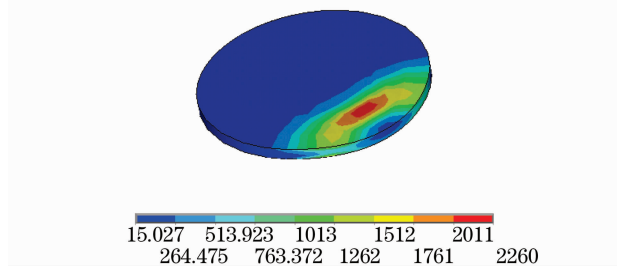


图 3 磨盘应力分布

Fig. 3 Pressure distribution of lap

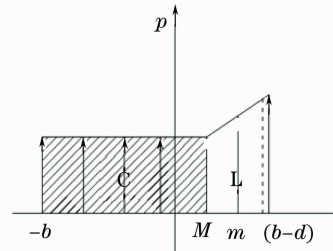


图 4 常量—线性模型应力分布

Fig. 4 Pressure distribution of constant-linear model

根据力和力矩的平衡原理,得到常量区的压力

p_c 以及线性增长区的斜率 k

$$\left\{ \begin{aligned} p_c &= \frac{f_0 \iint_L x(x-M) dx dy}{\iint_{\text{all}} dx dy \times \iint_L x(x-M) dx dy - \iint_L (x-M) dx dy \times \iint_{\text{all}} x dx dy} \\ k &= \frac{-f_0 \iint_{\text{all}} x dx dy}{\iint_{\text{all}} dx dy \times \iint_L x(x-M) dx dy - \iint_L (x-M) dx dy \times \iint_{\text{all}} x dx dy} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

则压力的分布可以表示为

$$p(x) = \begin{cases} p_c & (\text{C area}) \\ p_c + k(x-M) & (\text{L area}) \end{cases} \quad (6)$$

根据普林斯顿假设,磨盘的去函数可以表示为

$$R = \frac{1}{T} \int_0^T k p(x, y, t) v(x, y, t) dt \quad (7)$$

将(6)式代入(7)式,即可获得磨盘在漏边状态下修正后的去函数 R_m , 利用卷积迭代算法,确定磨盘在各点的驻留时间,从而实现了工件表面面形的精确控制。

5 计算机模拟加工

以一块 $\phi 124$ mm, 离轴量 240 mm 离轴抛物面

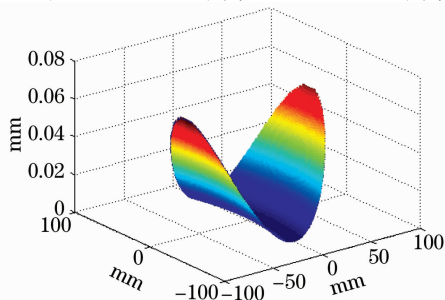


图 5 非球面度分布

Fig. 5 Asphericity of off-axis aspherics

镜为例,利用上述方法求得最接近球面半径 $R = 1225.397$ mm, 最大非球面度 0.0628 mm。非球面度的分布及其等高线如图 5 和 6 所示。未对边缘进行处理时,面形均方根(RMS)值由 0.018 mm 降至 0.007 mm, 但边缘效应十分明显[见图 7(a)]; 引入常量线性模型后, RMS 值减小为 1.14×10^{-5} mm [见图 7(b)]。

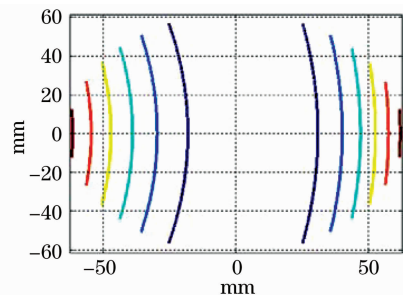


图 6 非球面度等高线

Fig. 6 Contours of asphericity

6 结 论

离轴非球面数控小工具加工模型的建立能有效指导离轴非球面加工工艺的研究,但成熟的加工工艺需要在大量的加工实验中逐步完善。目前上述 $\phi 124$ mm 离轴抛物面镜正在加工过程中,预计实际面形误差均方根值可以达到 $\lambda/25$ 。

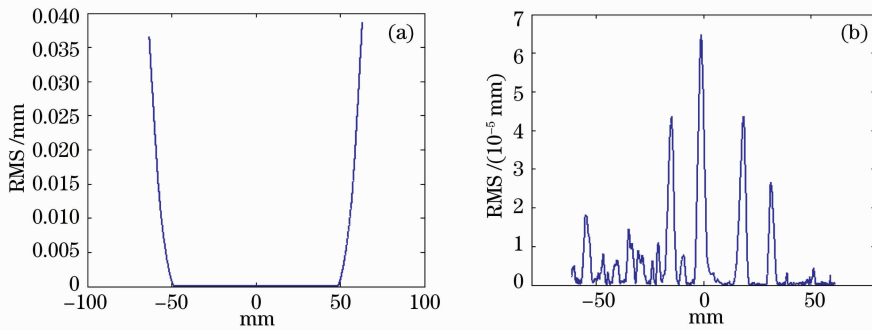


图7 残余误差分布。(a) 边缘效应未处理;(b) 处理边缘效应后

Fig. 7 One dimensional surface errors. (a) Before edge figuring; (b) after edge figuring

参 考 文 献

- 1 Yang Li. Advanced Optical Manufacture Technology [M]. Beijing: Science Press, 2001
杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- 2 Wang Quandou. Study on computer controlled manufacturing technology of off-axis aspherics [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000, 1~3
王权陡. 计算机控制离轴非球面制造技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000, 1~3
- 3 Yu Jingchi, Zhang Xuejun, Sun Xiafei *et al.*. On the technology of computer controlled optical surfacing[J]. *Optical Technology*, 1998, **5**(3): 6~8
余景池, 张学军, 孙侠菲 等. 计算机控制光学表面成形技术综述[J]. *光学技术*, 1998, **5**(3): 6~8
- 4 Zhang Xuejun, Weng Zhicheng, Zhang Zhongyu *et al.*. Manufacturing and testing of two off-axis aspherical mirrors[C]. *SPIE*, 2001, **4451**: 118~125
- 5 Fan Bin, Wan Yongjian, Chen Wei *et al.*. Manufacturing features comparing between computer control active-lap and computer control optical surface for large aspheric optics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 128~132
范斌, 万勇建, 陈伟 等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 128~132
- 6 Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for machining large-diameter optical aspheric mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1705~1709
陈建平, 沈林成. 大口径非球面镜加工建模与控制技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1705~1709
- 7 Dai Yifan. Model building and simulation of computer control deterministic grinding and polishing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005, 8~21
戴一帆. 计算机控制确定性研抛的建模与仿真[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005, 8~21
- 8 Pan Junhua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004
潘君骅. 光学非球面的设计加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004
- 9 Wu Fan. Calculation method of asphericity of high order aspherical surface[J]. *J. Applied Optics*, 1992, **13**(1): 15~19
伍凡. 高次非球面非球面度的计算方法[J]. *应用光学*, 1992, **13**(1): 15~19
- 10 Cheng Haobo, Zhang Xuejun, Zheng Ligong *et al.*. Optimizing the moving-orbit for off-axis aspheric manufacturing and testing [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(2): 247~249
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