

文章编号 1004-924X(2007)05-0633-07

大口径高陡度离轴非球面精磨阶段的数控加工

李锐钢^{1,2}, 郑立功¹, 张峰¹, 薛红梅³, 张学军¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心, 吉林 长春 130031;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038)

摘要: 对大口径高陡度离轴非球面的数控加工过程中遇到的矢高变化率太大、磨头去除特性改变等技术难题进行了深入细致的研究, 并提出了相应的解决方法。首先, 通过坐标变换降低高陡度离轴非球面的矢高变化率; 然后, 给出了磨头沿非球面的法线方向进行数控加工的具体实施方法; 最后, 对轮廓检验的结果进行修正, 使之在法线方向投影, 从而使数控加工能更加准确有效地控制面形误差收敛。给出了数控加工实例, 精磨阶段达到面形精度 PV: 10.502 8 μm , RMS: 0.829 3 μm 。结果表明, 提出的方法在工程中完全可行, 并有较高的收敛效率。

关键词: 高陡度非球面; 坐标变换; 法线方向面形; 数控加工

中图分类号: TQ171.68 **文献标识码:** A

Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture

LI Rui-gang^{1,2}, ZHENG Li-gong¹, ZHANG Feng¹, XUE Hong-mei³, ZHANG Xue-jun¹

- (1. *Optical Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Hebei University of Engineering, Handan 056038, China*)

Abstract: By studying and discussing on the technical puzzles of the high sagitta variation rate and the seriously changed removal characteristic of lap in computer controlled optical surfacing of highly steep off-axis aspheres with large aperture, the practicable solutions are given. Decreasing the sagitta variation rate through coordinates transforming, the computer controlled manufacturing method that the lap grinds along the normal of the asphere is carried out, then, revising the figure testing result to project it on the asphere's normal, and the revised result is used in computer controlled optical manufacturing to converge the figure error more precise and effective. Finally, a manufacturing example is given in the final figure precision of PV: 10.502 8 μm and RMS: 0.829 3 μm during fine grinding stage. The results show that the methods are practical and have even higher convergence efficiency.

Key words: highly steep asphere; coordinate transforming; figure on normal direction; computer controlled manufacturing

收稿日期: 2007-02-02; 修订日期: 2007-04-13.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (No. 69925512)

1 引言

光学设计中采用非球面元件可以减少系统中元件的数量,进而减轻其重量、减小其体积,同时也可以降低系统复杂程度,并提高系统性能。非球面光学元件之所以具有这些优点,是因为它在光学设计中比球面元件更有效地校正了像差。虽然非球面元件有如此多的优点,但它特殊的几何形状使加工和检测方法不同于球面元件,所以无论是制造难度还是制造成本都要远远高于球面元件^[1]。

从上世纪 60、70 年代开始,国内外众多光学领域的科学工作者进行了非球面的加工和检测方面的研究,国内从上世纪 80 年代也开始研究大口径非球面的加工和检测,取得了一些显著的成果^[2-7],不过,在很多技术环节上与国际一流水平相比仍存在着差距,具体体现在以下几个方面:(1)超大尺寸光学镜面的加工(4 m 以上);(2)大尺寸超薄光学镜面的加工(径厚比大于 50:1);(3)大相对孔径非球面的加工^[8]。

大相对孔径非球面用于红外光学系统中,可以获得更高的能量,并能使光学系统更加紧凑。但是与大相对孔径非球面对应的非球面面形必然具有高的陡度,非球面的高陡度带来了加工和检测上的一系列难题,这也是光学加工人员谈“高陡度”而色变的主要原因。本文针对大口径高陡度离轴高次非球面在数控加工过程中遇到的技术难题进行了探讨,并给出了数控加工实例。

2 高陡度非球面数控加工所面临的问题及其解决方法

计算机控制光学表面成形技术(CCOS)是指根据定量的面形检测数据,在加工控制模型的基础上,用计算机控制一个小磨头(直径通常小于工件直径的 1/4)对光学零件进行研磨或抛光,通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间相对压力来控制材料的去除量,图 1 为 CCOS 技术的原理图^[9]。在加工过程中,由于小磨头能够有效相对地跟踪非球面表面各点曲率半径的变化,因而能与非球面的面形良好吻合从而可获得

很高的加工精度;同时采用计算机控制,应用定量的检测结果指导加工过程,充分发挥计算机执行速度快,记忆准确等优势,从而使加工的重复精度及效率大幅度提高。

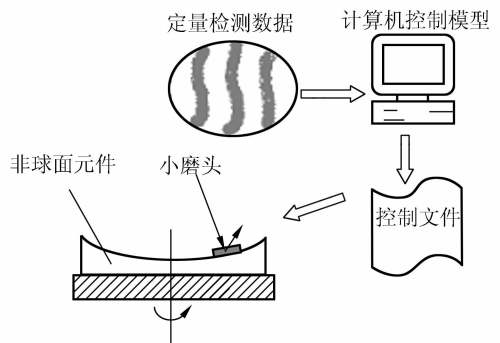
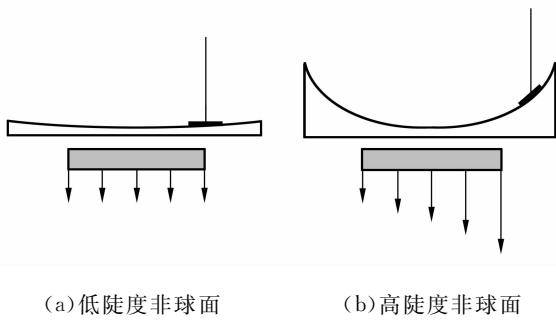


图 1 CCOS 技术原理图

Fig. 1 Principle of CCOS technology

数控加工过程中应尽可能地使磨头压力恒定作用于工件加工点的法向,这样磨头对工件的压力才可以认为是各点均匀的,才能使磨头的工作函数具有回转对称性,并且与理论计算相一致,从而可以比较准确地预测和控制实际的去除量。图 2 为沿矢高方向对磨头施加同一均匀压力时浅非球面与高陡度非球面工件所受到的压力分布对比示意图。对于浅非球面,由于其相对孔径较小,在整个加工范围内,光学表面各点的表面法向变化微小,几乎完全平行于磨头垂直作用力方向,所以磨头去除特性变化甚微,对加工质量基本无影响。但是对高陡度的非球面来说,在整个加工范围内,工件上各点的法向变化量较大。如果磨头在加工过程中仍保持同一方向,则磨头在工件表面移动时加压方向会与工件表面法向有较大偏离。这样就造成磨头各点受力状况不均匀,磨头去除特性的对称性发生较大的改变,最终难以对整个加工过程进行准确地预测与控制,使面形无法收敛到要求的光学表面面形^[10]。为了避免这种情况的发生,在整个加工过程中应随时调整磨头和工件的相对位置,使磨头转动轴方向与加工点表面法向一致,这一点对获得理想的面形精度是极为重要的。因此,对于高陡度非球面的数控加工,怎样保证磨头转轴方向与工件加工点表面的法线方向一致,是其面临的一个主要问题。

要实现磨头沿非球面的法线方向进行研磨,数控加工中心的硬件设计必须满足摆轴在进行数



(a)低陡度非球面 (b)高陡度非球面
 (a)Low steepness asphere (b)High steepness asphere
 图 2 低陡度非球面和高陡度非球面在加工中磨头压力分布的对比示意图

Fig. 2 Comparison of the manufacturing pressure dispersions of lapping tool for low and high steepness aspheres

控加工时可以与其它各轴实现联动,数控加工中心的设计者已经做到了这一点,而我们现在要做的是在软件控制上完成磨头沿工件法线方向加工这一操作。

2.1 通过坐标变换降低矢高变化率

对于高陡度离轴非球面的数控加工,为了降低加工难度,要把工件摆平,从而使矢高变化率降低到最小。在数学上即对非球面母镜坐标系(XOZ)进行平移和旋转的坐标转换得到新的坐标系(X'O'Z'),见图 3。

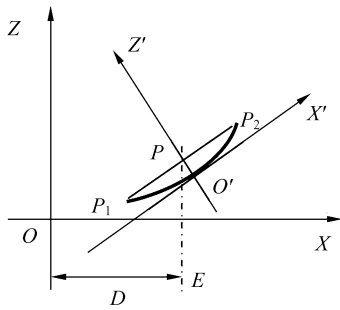


图 3 对高陡度离轴非球面进行坐标变换的示意图^[11,12]
 Fig. 3 Coordinates transforming for highly steep off-axis asphere

非球面方程的一般表达式如下^[13]:

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

其中: $S^2 = x^2 + y^2$; $c = 1/r$, 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。

图中 D 为离轴量, P 为直线 P_1P_2 的中点, P_1 和 P_2 的坐标由光学设计者给出的非球面方程及非球面外形尺寸可以很容易计算得出,进而 P 的坐标可求。直线 P_1P_2 的斜率可由 P_1 和 P_2 的坐标计算,因为直线 PO' 与直线 P_1P_2 垂直,所以直线 PO' 的斜率也可求出,根据点斜式求出直线 PO' 的方程,再与非球面方程联立即可求解出 O' 的坐标。

把母镜坐标系 OXZ 变换到新坐标系 $O'X'Z'$ 下,需通过平移和旋转两步,设 O' 点在 OXZ 坐标系中解出的坐标为 (a, b) , 坐标变换旋转的角度

$\theta = -\arctan(\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1})$ (一般光学设计者直接给出), x_1, z_1 为 P_1 点坐标, x_2, z_2 为 P_2 点坐标。则旧坐标系中任意一点在新坐标系中的坐标可以用以下的坐标变换求得:

$$\begin{pmatrix} X' & Y' & Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a & 0 & b \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

2.2 坐标变换后法线角度的求解

数控加工中心在工件上各点的摆轴角度,实际上对应的就是非球面上各点的法线与 Z 轴的夹角。

对非球面方程求偏导可得出非球面上各点切线斜率: $\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}$,

则各点法线与坐标轴夹角:

$$\theta_x = \arctan(\frac{\partial z}{\partial x}), \theta_y = \arctan(\frac{\partial z}{\partial y}),$$

坐标变换后,在新坐标系下各点法线斜率为^[14]:

$$\frac{\partial z'}{\partial x'} = \tan(\theta_x - \theta), \frac{\partial z'}{\partial y'} = \tan(\theta_y)$$

$$\cos(\theta_{z'}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\partial z'}{\partial x'})^2 + (\frac{\partial z'}{\partial y'})^2}}$$

摆平后,非球面各点的法线与 Z' 轴的夹角为:

$$\theta_{z'} = \arccos(\frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{\partial z'}{\partial x'})^2 + (\frac{\partial z'}{\partial y'})^2}})$$

这样,根据轮廓检验的结果和 Preston 假设计算出数控加工文件,由数控加工中心控制 X 、 Y 、 Z 、 U (转台转轴)、 V (摆轴)、 W (磨头转轴)的六轴联动对工件进行研磨去除。

2.3 轮廓检验结果的修正

非球面轮廓测量的原理,就是将实际检测获得的被检件离散点矢高值与理论矢高值进行比较,获得面形误差的离散数据,然后再进行面形重构,获得面形误差分布的测量方法,按照轮廓测量选取基准坐标系。非球面轮廓测量仪可以分为球面基准轮廓仪和平面基准轮廓仪,本文讨论的是平面基准坐标系。

由非球面轮廓检验的原理描述可以看出,轮廓检验获得的面形误差分布是非球面上各点沿 Z 轴方向与理论值的偏差,而前面提到对于高陡度离轴非球面的数控加工,磨头研磨是沿非球面上各点的法线方向进行,因此若把轮廓检验得到的面形误差结果直接用于数控加工,将会出现很大的加工误差,甚至面形误差无法收敛。

所以,应该把矢高方向的面形误差图转换成法线方向的面形误差图。对于非球面上每一具体点来说,根据 2.2 中求得的非球面各点的法线与 Z' 轴的夹角,把各个点矢高方向的误差值在该点的法线方向上投影,即把各个点矢高方向的误差值乘以该点的法线与 Z' 轴夹角的余弦,见图 4。对于非球面上任意点 (X_i, Y_i) ,在法线上的误差值与 Z 轴上的误差值的关系为:

$$N_i' = Z_i' \cdot \cos(\theta_{Z'})$$

Z_i' 为非球面上某点矢高方向实际值与理论值的偏差值,也就是误差值, $\theta_{Z'}$ 为该点法线与 Z' 轴的夹角。

这样计算出各点法线方向上的误差值之后,再进行面形重构,得出工件法线方向上的面形误差分布,经修正后的面形误差结果,就可用于高陡度离轴非球面的数控加工了。

3 加工实例

某高陡度离轴高次非球面(体育场形),口径为 $400 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$,离轴量为 150 mm , K 为 0.110713 ,顶点曲率半径为 600.4687 mm , A_4 为 $1.278834e^{-12}$,该非球面的 R 数达到 $1/1.17$,陡度之高在国内实属罕见。首先对非球面进行摆

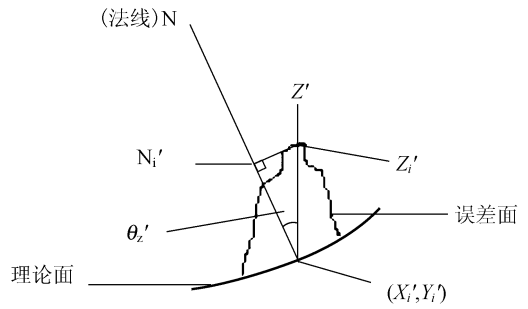


图 4 面形误差法线方向投影

Fig. 4 Normal projection of figure error

平的坐标系平移和旋转变换,坐标变换前后子午方向的母线对比图如图 5,坐标变换前后的理论矢高的 PV 值由原来的 73.7762 mm 变为 18.2320 mm ,弧矢方向的母线量值不发生变化;坐标变换前后的理论面形图如图 6,坐标变换前理论面形的 PV 为 81.9171 mm ,RMS 为 21.8784 mm ;坐标变换后 PV 为 31.7935 mm ,RMS 为 8.0612 mm 。由坐标变换前后母线和面形的对比图和面形误差量值的对比可以很明显地看出,进行坐标变换对非球面进行摆平后,工件的矢高变化率大大降低,从而数控加工的难度也显著降低,不仅提高了加工效率,缩短了加工周期,同时也减少了加工的成本。

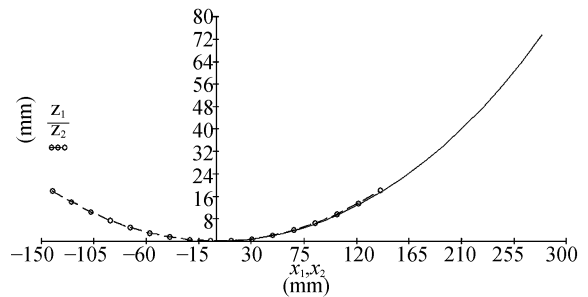
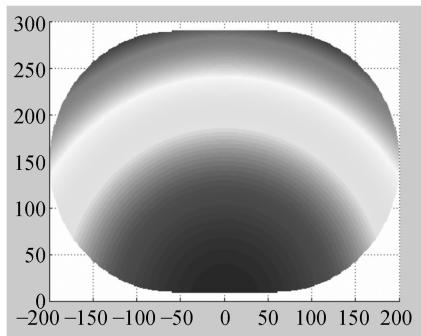


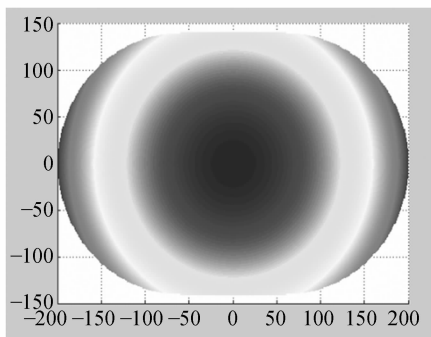
图 5 坐标变换前(Z_1)后(Z_2)的理论母线对比

Fig. 5 Comparison of the asphere's theoretical generatrix before (Z_1) and after (Z_2) coordinates transforming

根据上面提到的方法,计算出各点摆轴角度,如图 7,近似成回转对称,最大摆角 8.6° ,在工件最外边缘,最小摆角 0° ,在原点处。图 8 是数控加工时的工作照片,可以看出镜面陡度非常高,到镜面边缘时摆轴要摆出相当大的角度才能满足沿法线方向进行加工。



(a)



(b)

图 6 坐标变换前(a)后(b)的理论面形对比图
Fig. 6 Comparison of the asphere's theoretical figure before (a) and after (b) coordinates transforming

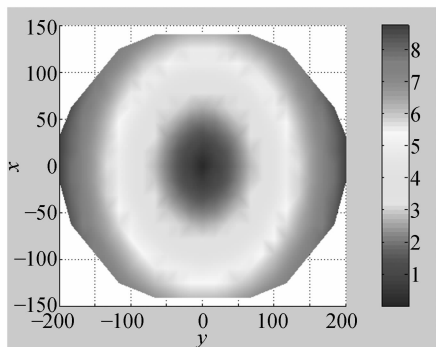


图 7 数控加工时非球面各点的摆角大小分布图
Fig. 7 Swing angle of each point on asphere in computer controlled manufacturing

每一个加工周期结束后,用数控加工中心的在线轮廓仪进行在线面形检测,对检测得到的面形结果在整个非球面各点的法线上投影得到法线方向上的面形分布,利用法线方向上的面形分布结果,设定加工参数,做出数控加工文件,进行下一加工周期,如此循环,直到满足精磨阶段的指标

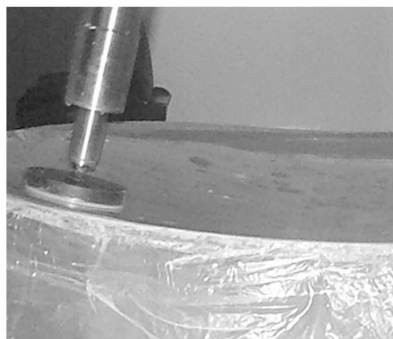


图 8 高陡度离轴非球面数控加工时的磨头工作照片
Fig. 8 Picture during computer controlled manufacturing of highly steep off-axis asphere

要求(一般控制在 RMS: $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$)。图 9 为精磨阶段最终达到的面形精度, PV: $10.5028 \mu\text{m}$, RMS: $0.8293 \mu\text{m}$, 满足要求。图 10 为精磨阶段的收敛曲线,图中 Y 轴为面形的均方根值, X 轴为时间轴,在 240 h 的纯工作时间内从均方根 $60.5321 \mu\text{m}$ 收敛到均方根 $0.8293 \mu\text{m}$ 。

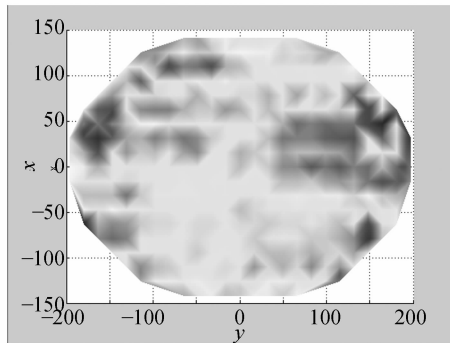


图 9 精磨阶段最终结果 (PV: $10.5028 \mu\text{m}$; RMS: $0.8293 \mu\text{m}$)
Fig. 9 Final testing result of the fine grinding stage (PV: $10.5028 \mu\text{m}$; RMS: $0.8293 \mu\text{m}$)

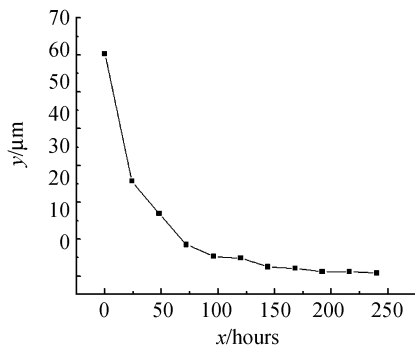


图 10 精磨阶段的收敛曲线
Fig. 10 Convergence curve of fine grinding stage

4 结 论

本文针对大口径高陡度离轴非球面的数控加工这一困扰光学加工技术人员多年的技术难题,提出了一整套具体的解决方案。首先提出对高陡度离轴非球面利用坐标变换摆平后进行数控加工,使矢高变化率降到最小,这大大降低了数控加工的难度;然后,对由于非球面的高陡度带来的磨头工作函数不对称问题,提出让磨头产生一个摆角,从而磨头沿非球面的法线进行研磨的方案,并给出了求摆角的具体算法;最后还用在了法线方向上投影的方法对轮廓检验的结果进行修正,使之

更加严谨地适用于高陡度离轴非球面的数控加工。用一个加工实例验证了大口径高陡度离轴非球面的数控加工方法的可行性,精磨阶段达到面形精度为 PV:10.502 8 μm , RMS:0.829 3 μm ,证明文中提到的方法完全切实可行,并具有较高的面形收敛效率。本文提到的所有方法无疑对非球面数控加工工作者有着很强的借鉴意义,特别是解决大口径高陡度离轴非球面的数控加工这一难题,为非球面光学加工能力的不断提高做出了应有的贡献。当然,解决高陡度非球面的数控加工,还有其他要做的工作,比如,磨头结构的改进、加工轨迹的选择等,希望将来能和光学加工界的同仁来共同探讨。

参考文献:

- [1] RUCKMAN J, FESS E M, GEE D V. Recent advances in aspheric and conformal grinding at the center for optics manufacturing [J]. *SPIE*, 1992, 3782: 2-10.
- [2] 李锐钢,郑立功,薛栋林,等. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):533-538.
LI R G, ZHENG L G, XUE D L, *et al.*. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 533-538. (in Chinese)
- [3] FERRARI M, MAZZANTI S, LEMAÎTRE G. Fabrication of a highly variable curvature mirror: testing and results [J]. *SPIE*, 1995, 2576: 270-280.
- [4] 薛栋林,张忠玉,张学军. 一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2):198-204.
XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHANG X J. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 198-204. (in Chinese)
- [5] HUMPHRIES C M, NEVO Y, ETTEDEGUI-ATAD E, *et al.*. Optical design and testing of a fast, large aperture, infrared space telescope [J]. *SPIE*, 1991, 1531: 20-36.
- [6] 郑立功,张学军,张峰. 矩形离轴非球面反射镜的数控加工[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)
- [7] 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)
- [8] 张学军,张云峰,余景池,等. FSGJ-1 非球面自动加工及在线检测系统[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(2): 70-76.
ZHANG X J, ZHANG Y F, YU J CH, *et al.*. FSGJ-1 system of asphere automaking and on-line testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(2): 70-76. (in Chinese)
- [9] JONES R A, RUPP W J. Rapid optical fabrication with computer-controlled optical surfacing [J]. *Opt. Eng.*, 1991, 30(12): 1962-1968.
- [10] 郑为民,曹天宁,卢华云,等. 高陡度精密光学非球面 CAM 系统 [J]. *光学技术*, 1997, 4: 35-40.
ZHENG W M, CAO T N, LU H Y, *et al.*. CAM system of high gradient precise optical aspheric surface [J]. *Opt. Tech.*, 1997, 4: 35-40. (in Chinese)
- [11] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验 [M]. 北京:科学出版社,1994.
PAN J H. *Design, Manufacturing and Testing of Optical Asphere* [M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)

- [12] 王权陡,余景池,张学军,等. 离轴非球面最接近球面半径及非球面度的求解 [J]. 光电工程, 2000,27(3): 16-19.
WANG Q D, YU J CH, ZHANG X J, *et al.*. Solution for best fitting spherical curvature radius and asphericity of off-axis aspherics [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2000, 27(3): 16-19. (in Chinese)
- [13] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. Second Edition, Wiley Interscience,1992.
- [14] 同济大学数学教研室. 高等数学 [M]. 北京:高等教育出版社,1988.
Mathematics Teaching Research Office of Tongji University. *Higher Mathematics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1988. (in Chinese)

作者简介:李锐钢(1975—),男,河北邯郸人,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在职博士研究生,主要研究方向为大口径非球面反射镜加工和检测技术的研究。E-mail: Liruigang@sohu.com

郑立功(联系作者)(1969—),男,吉林人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,主要研究方向为大口径非球面数控加工和检测的研究。