

DOI: 10.3901/JME.2014.09.169

# 确定性抛光非球面光学元件残余误差的评价方法\*

王春锦 王振忠 潘 日 谢银辉 郭隐彪  
(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

**摘要:** 研究非球面光学元件确定性抛光中表面残余误差的评价方法。对两种非球面残余误差的评价方法,分别为轴向误差法和法向误差法,进行理论研究。指出非球面的残余误差理论上应使用法向误差法来评价,并提出一种基于轴向残余误差求解法向残余误差的方法,继而二者进行比较发现两者存在一定的偏差,并且差值从非球面的中心向边缘方向逐渐增大。以气囊抛光和数控小磨头抛光为例,通过试验表明使用轴向误差法评价残余误差,进行确定性抛光引入了不同程度的加工误差,引入的加工误差的大小与非球面光学元件的口径和顶点曲率半径的比值(即“相对孔径”)成正相关,故对于相对孔径较小的非球面光学元件在确定性抛光中可使用轴向误差法替代法向误差法作为残余误差的评价方法,反之,则应使用法向误差法。

**关键词:** 确定性抛光; 非球面光学元件; 残余误差; 评价方法

**中图分类号:** TQ171

## Research on the Residual Error Evaluation Method for Deterministic Polishing of Aspheric Optics

WANG Chunjin WANG Zhenzhong PAN Ri XIE Yinhui GUO Yinbiao  
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract:** Residual error evaluation method for deterministic polishing of aspheric optics is studied. Two residual error evaluation methods, which are axis-direction error method and normal error method respectively, are researched theoretically. It's inferred that the residual error of aspheric surface should be evaluated by normal error method. A new approach is proposed to calculate normal direction residual error on the basis of the axis-direction residual error of the aspheric surface. There exists difference between these two kinds of error which increases from the center of the aspheric optic to the edge through the comparison of them. Taking bonnet polishing and numerical controlled small tool polishing as examples, experiments are made to quantitatively prove that using axis-direction error method to evaluate residual error in deterministic polishing would introduce different degrees of processing error. It's found that the processing error is positively correlated with the relative aperture of aspheric optics, which is the ratio of the optic's aperture and vertex's curvature radius. Therefore, it is recommended to use axis-direction error method instead of normal error method as the evaluation method of the residual error during deterministic polishing aspheric optics with relatively small relative aperture; the opposite is the other way around.

**Key words:** deterministic polishing; aspheric optics; residual error; evaluation method

## 0 前言

非球面光学元件鉴于其优良的特性,在现代光学系统中得到广泛的应用,如空间望远镜、激光武器、激光核聚变装置以及战略战术导弹等国防关键技术<sup>[1]</sup>。随着现代科技的飞速发展,对光学元件的形状精度、粗糙度以及亚表面损伤程度的要求越来越高,而抛光作为加工过程的最后一步,该技术水平的高低将直接影响能实现的光学元件表面精度。

确定性抛光技术由于其具有能够对工艺参数实现精确控制,产生确定的去除函数,准确控制去除量的突出优点,已被大量应用于光学元件的抛光<sup>[2-3]</sup>,如数控小磨头抛光技术<sup>[4-5]</sup>,气囊抛光技术<sup>[6-8]</sup>,磁流变抛光技术<sup>[9-10]</sup>,离子束抛光技术<sup>[11-12]</sup>,射流抛光技术<sup>[13]</sup>等。

确定性抛光中的残余误差指当前工件表面的面形与目标工件表面面形的差值,它的确定直接影响工件的最终面形精度。非球面光学元件的检测技术现主要有几何光线检测法<sup>[14]</sup>,干涉测量法<sup>[15-16]</sup>,直接的面形轮廓法<sup>[17]</sup>等,可用于检测工件的最终面形精度,亦可用于检测确定性抛光中需要测量的残

\* 国家科技重大专项资助项目(2013ZX04006011-206)。20130418 收到初稿,20140226 收到修改稿

余误差。但目前对于确定性抛光中残余误差评价方法的研究甚少,更不用说其对非球面最终面形精度的影响。

非球面光学元件确定性抛光中的残余误差评价方法从特征上可以分为两种,分别为轴向误差法和法向误差法<sup>[18]</sup>。轴向误差法即为使用沿着光学元件轴向偏离理想表面的差值评价残余误差;法向误差法即为使用沿着非球面法向偏离理想表面的差值评价残余误差。由于轴向误差法易于实现,其常被用于评价残余误差。但对于非球面光学元件,若使用轴向误差法评价残余误差,必然引入加工误差。本文对两种残余误差评价方法进行了理论研究,对比得出二者的区别,最后通过试验分析了确定性抛光不同相对孔径非球面光学元件,使用轴向误差法作为残余误差的评价方法引入了不同程度的加工误差,得出了加工误差的大小受光学元件的口径和顶点曲率半径的比值(即“相对孔径”)的影响规律,将对确定性抛光中残余误差的评价发挥一定的指导作用。

## 1 残余误差理论研究

### 1.1 法向误差计算方法

为了简化计算模型,现以轴对称非球面光学元件为研究对象,研究其法向残余误差的计算方法。轴对称光学元件是一旋转体,其有多种表达方式,其母线方程可表示为<sup>[19]</sup>

$$z = f(x) = -\frac{Cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C^2x^2}} - \sum_{i=2}^N a_{2i}x^{2i} \quad (1)$$

式中  $C=1/R_0$ ;

$R_0$ ——非球面基础半径;

$k$ ——非球面系数;

$a_{2i}$ ——高次项系数。

式(1)中, $z$ 轴为旋转轴,非球面顶点为原点。

由于确定性抛光技术中,抛光工具的运动轨迹是沿着非球面工件表面,其去除函数的去除方向均是相对于抛光接触区的法线方向,故在计算表面残余误差时,应以非球面的法线方向为准。由于非球面的轴向残余误差易于测得,可利用干涉仪,三坐标测量仪等仪器测得,故可考虑在测得的轴向残余误差的基础上获得非球面的法向残余误差。

图 1 为非球面法向残余误差的求解模型, $\theta$  为非球面上点  $B$  的法线方向与  $x$  轴的夹角,则法向残余误差  $\Delta n$  可用  $l_{AB}$  表示, $l_{AC}$  表示轴向残余误差  $\Delta z$ 。由图 1 中的几何关系可得,二者之间的关系可近似表达为

$$\Delta n = \Delta z \sin \theta \quad (2)$$

又

$$f(x)' = -\frac{2cx}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} - \frac{c^3x^3(1+k)}{2\sqrt{1 - (1+k)c^2x^2} \left[ 1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2} \right]^2} - 4a_4x^3 - 6a_6x^5 - \dots - 2na_{2n}x^{2n-1} \quad n=2,3,\dots \quad (3)$$

$$\theta = \arctan(f(x)') + \frac{\pi}{2} =$$

$$\arctan \left[ -\frac{2CM(1+M)x + C^3x^3}{M(1+M)^2} - 4a_4x^3 - 6a_6x^5 - \dots - 2na_{2n}x^{2n-1} \right] + \frac{\pi}{2} \quad n=2,3,\dots \quad (4)$$

其中

$$M = \sqrt{1 - (1+k)C^2x^2} \quad (5)$$

故从测得的轴向残余误差数据  $\Delta z$ ,代入式(2)~(5)即可求得法向残余误差数据。

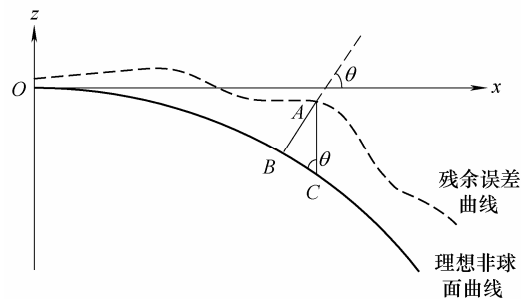


图 1 非球面法向残余误差求解模型

### 1.2 法向残余误差与轴向残余误差的对比

为了说明法向残余误差与轴向残余误差的偏差,本文应用上述算法对不同口径非球面光学元件的两种残余误差进行对比。由于目前非球面工件经磨削阶段后,即将进入下一阶段的抛光前,其面形精度一般介于  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  之间,为了体现一般性,轴向残余误差数据均选用  $0 \sim 4 \mu\text{m}$  范围内的随机数据,非球面光学元件选用不同口径的二次非球面和高次非球面,参数如表 1 所示。

表 1 非球面参数

编号	口径 $D/\text{mm}$	基础半径 $R_0/\text{mm}$	非球面 系数 $k$	高次项系数		
				$a_4$	$a_6$	$a_8$
1	400	2 000	-2	0	0	0
2	400	1 500	-2	0	0	0
3	400	1 000	-2	0	0	0
4	200	1 000	2	$-5 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-14}$	$-4 \times 10^{-18}$
5	100	1 000	2	$-5 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-14}$	$-4 \times 10^{-18}$
6	50	1 000	2	$-5 \times 10^{-10}$	$2 \times 10^{-14}$	$-4 \times 10^{-18}$

图2为不同口径和参数的非球面法向残余误差和轴向残余误差的对比结果。其中图2a~2f分别对表1中的1~6号非球面，每幅图的上半部分为法向残余误差和轴向残余误差在沿母线方向上的分布图，可见两者的偏差较小，分布点基本重合，为了便于分析，将二者相减，得到其差值

$$\Delta d = \Delta z - \Delta n \tag{6}$$

的分布图如图2中每幅图的下半部分所示。

由图2可知，非球面法向残余误差与轴向残余误差之间的偏差从中心到边缘呈逐渐变大的趋势，且在初始面形误差PV值为4 μm的前提下，二者偏

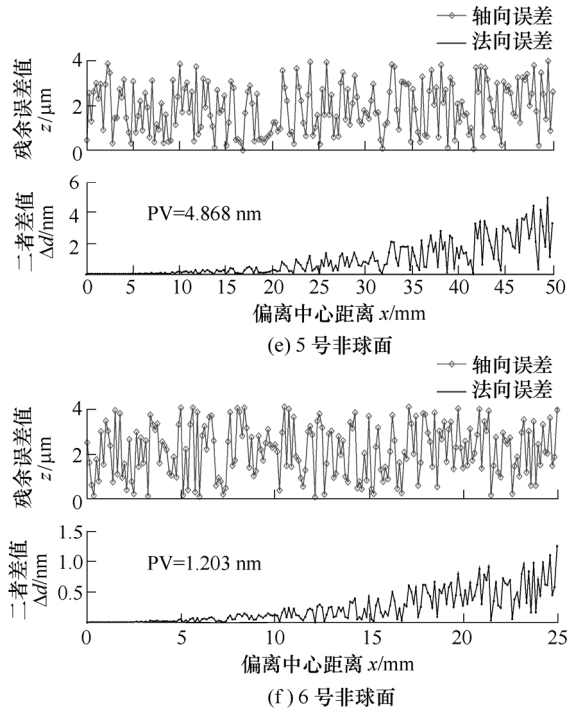
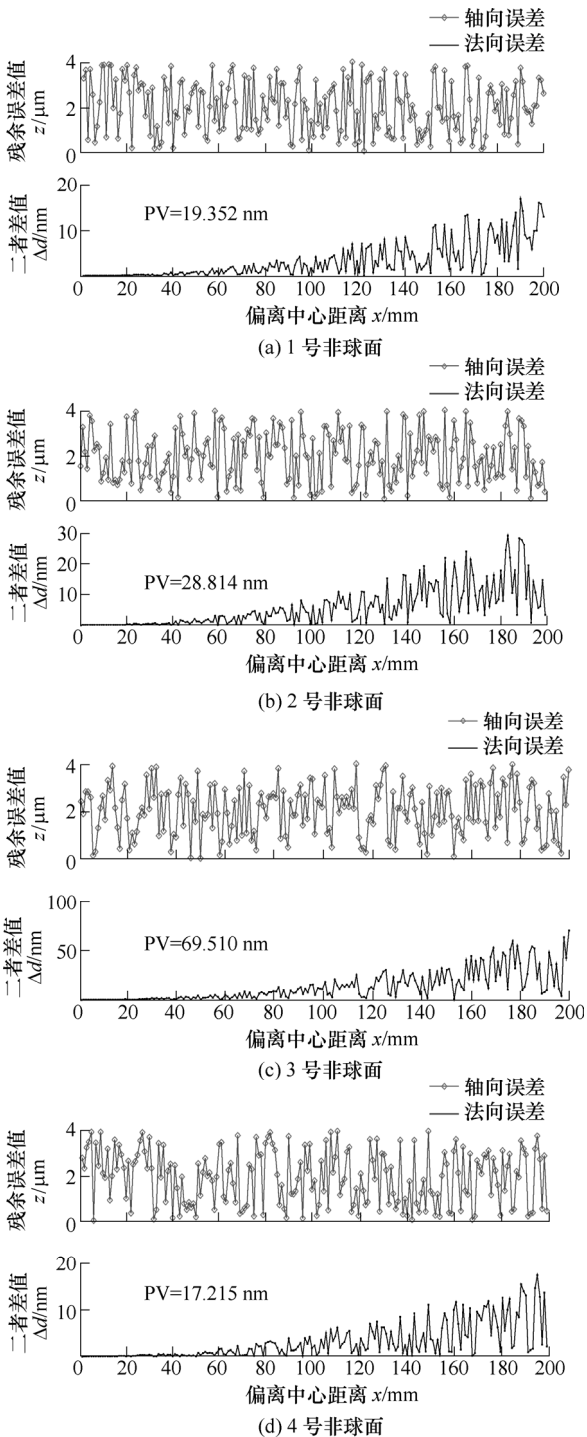


图2 不同非球面法向残余误差与轴向残余误差对比

差的PV值介于几纳米到几十纳米之间，而确定性抛光后的工件的面形精度往往要求达到几十纳米甚至几纳米的精度，粗糙度低于1 nm，故两者的误差在确定性抛光中的影响不容忽视。

观察图2中残余误差点的分布以及其与Δd的对应关系，可以发现残余误差值越大的点，其对应的Δd也越大。另外，为进一步研究Δd的变化规律，设相对孔径为η

$$\eta = D/R_0 \tag{7}$$

将表1中的非球面分为两类进行对比，一种是非球面口径不变，改变非球面的基础半径；另一种是非球面的基础半径不变，改变非球面口径。将这两种情况仿真得到的Δd的PV值从图2中提取出并绘制如图3所示的曲线。从图3中可以看出，当非球面口径不变时，减小非球面基础半径将增大Δd的PV值；当非球面基础半径不变时，减小非球面口径将减小Δd的PV值。结合两条曲线的结果可以发现，在非球面的初始误差PV值一致的前提下，

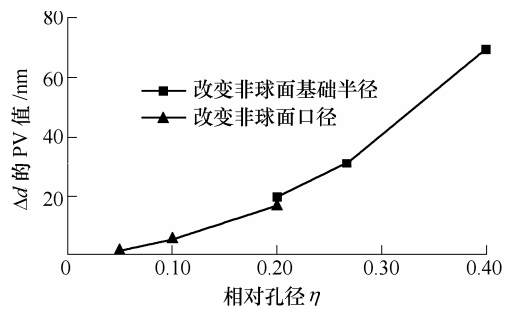


图3 Δd的PV值随相对孔径的变化图

其相对孔径  $\eta$  越大, 法向残余误差和轴向残余误差差值  $\Delta d$  的 PV 值将越大。

## 2 试验设计

为了准确描述使用轴向误差法评价残余误差进行确定性抛光引入的加工误差, 且排除其他工艺条件的影响, 决定采用仿真加工试验的方法而不用实际的加工试验进行对比。试验步骤如下。

(1) 根据非球面的初始轴向残余误差, 结合相应的去除函数, 使用基于线性代数和正则化方法的驻留时间算法<sup>[20]</sup>求解确定性抛光所需的驻留时间矩阵, 同时得到预期的非球面抛光后的轴向面形误差数据;

(2) 将驻留时间矩阵和去除函数矩阵进行卷积运算来模拟实际抛光的材料去除量。由于实际抛光过程中, 抛光的去除函数是相对于抛光接触区法线方向的, 故该步骤得到的去除量为实际的非球面法向去除量。

(3) 将步骤(2)得到的非球面的法向去除量转化为轴向去除量, 其方法是由轴向误差计算法向误差的逆过程, 参考式(2)~(5)。

(4) 在初始的轴向面形误差数据的基础上减去步骤(3)中得到的轴向去除量, 即可得到非球面经仿真抛光后得到的最终的轴向面形误差数据。

(5) 将步骤(4)中得到的最终的轴向面形误差数据与步骤(1)中得到的预期的非球面抛光后的轴向面形误差数据进行对比, 即可得出基于轴向误差的残余误差评价方法对抛光后非球面面形精度的影响程度。

针对两块相同口径、不同相对孔径的非球面镜头, 在相同初始面形残余误差的条件下, 分别采用确定性抛光中具有代表性的气囊抛光和数控小磨头抛光进行仿真加工。表 2 为用于仿真试验的非球面镜头参数, 非球面镜除了相对孔径不同, 其余参数均一致。图 4 为非球面镜头的初始轴向残余误差分布图。

表 2 非球面镜头参数

编号	口径 $D/mm$	相对孔径 $\eta$	非球面系数	
1	200	1/4	-1	
2	200	1/15	-1	
高次项系数				
编号	$a_4$	$a_6$	$a_8$	$a_{10}$
1	$-4.838 \times 10^{-9}$	$1.491 \times 10^{-13}$	$-3.913 \times 10^{-18}$	$1.851 \times 10^{-20}$
2	$-4.838 \times 10^{-9}$	$1.491 \times 10^{-13}$	$-3.913 \times 10^{-18}$	$1.851 \times 10^{-20}$

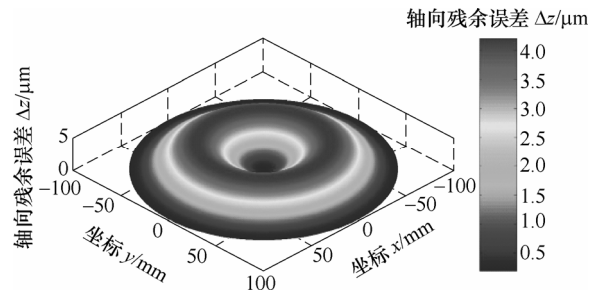


图 4 初始轴向残余误差分布图

表 3 为气囊抛光的工艺条件, 图 5 为表 3 所示工艺条件下, 根据气囊抛光的去除函数公式仿真出的气囊抛光去除函数三维图。表 4 为数控小磨头抛光的工艺条件, 图 6 为表 4 所示工艺条件下, 仿真出的数控小磨头抛光去除函数三维图。图 5 和图 6 中的去除函数将分别用于试验步骤(1)中气囊抛光和数控小磨头抛光的驻留时间的计算。

表 3 气囊抛光工艺条件

工件材料	气囊工具半径 $r_t/mm$	主轴转速 $n/(r/min)$
BK7	80	3 000
气囊充气压力 $p/MPa$	接触区半径 $r_c/mm$	进动角 $\alpha/(^\circ)$
0.1	12	23

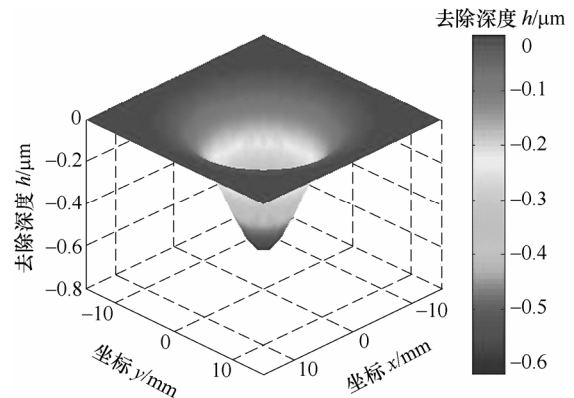


图 5 气囊抛光去除函数三维图

表 4 小磨头抛光工艺条件

工件材料	磨头半径 $r/mm$	自转转速 $n_1/(r/min)$
BK7	25	-300
偏心率	抛光压强 $p/MPa$	公转转速 $n_2/(r/min)$
0.8	0.1	100

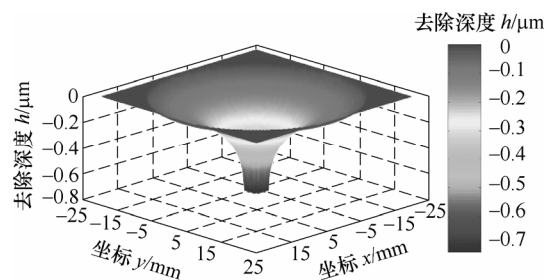


图 6 小磨头抛光去除函数三维图

### 3 试验结果与分析

图7和图8为两非球面分别使用气囊抛光和数控小磨头工艺，并基于轴向误差法评价残余误差，进行仿真加工，得到的期望的面形误差和仿真加工后工件表面最终的面形误差的结果对比图。图7、8中中心部分和边缘部分的凸起，是由于所使用的驻留时间算法存在边缘效应<sup>[20]</sup>的缘故。由于二者的初始残余误差一致，所使用的去除函数也一致，故通过仿真得到的期望面形误差也一致，如图7a和图8a所示。图7b、7c和图8b、8c分别是两者在排除其他因素影响的条件，仿真得到的最终工件表面的轴向面形误差。由图7和图8可知，期望的非球面轴向面形误差和仿真加工后的非球面轴向面形误差在三维图中很难看出区别，误差分布的趋势十分接近。为了方便二者的对比，分别提取了每种情况下的误差PV值。图7中气囊抛光后期望的非球面轴向面形误差的PV值为32.063 nm，1号非球面的实际的轴向面形误差PV值为39.399 nm，2号非球面的实际的轴向面形误差PV值为35.105 nm。图8中数控

小磨头抛光后期望的非球面轴向面形误差的PV值为40.278 nm，1号非球面的实际的轴向面形误差PV值为47.732 nm，2号非球面的实际的轴向面形误差PV值为43.425 nm。从以上结果中PV值的不同就可以确定仿真加工后得到的工件表面最终的轴向面形误差与抛光后期望的非球面轴向面形误差之间存在一定的偏差。

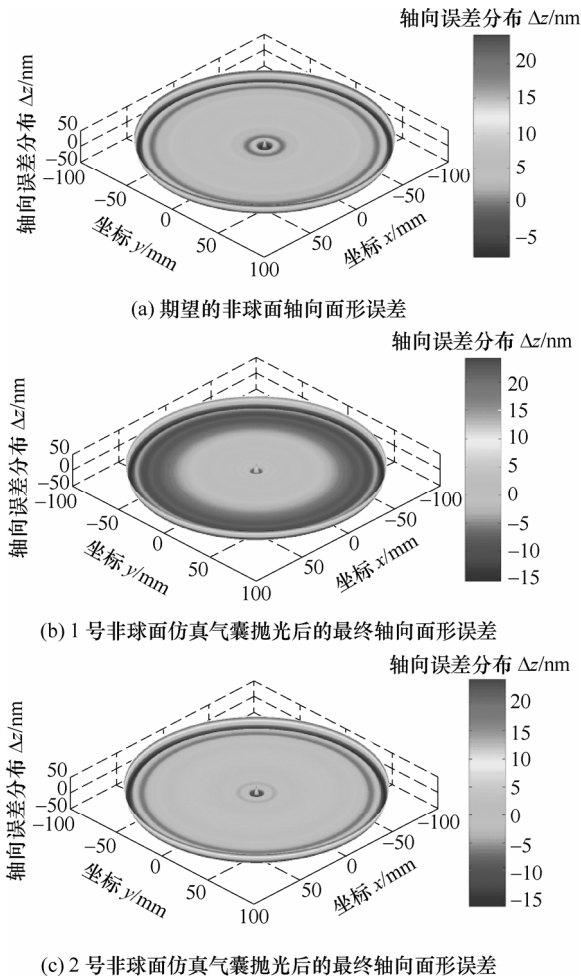


图7 气囊抛光后非球面轴向面形误差空间分布

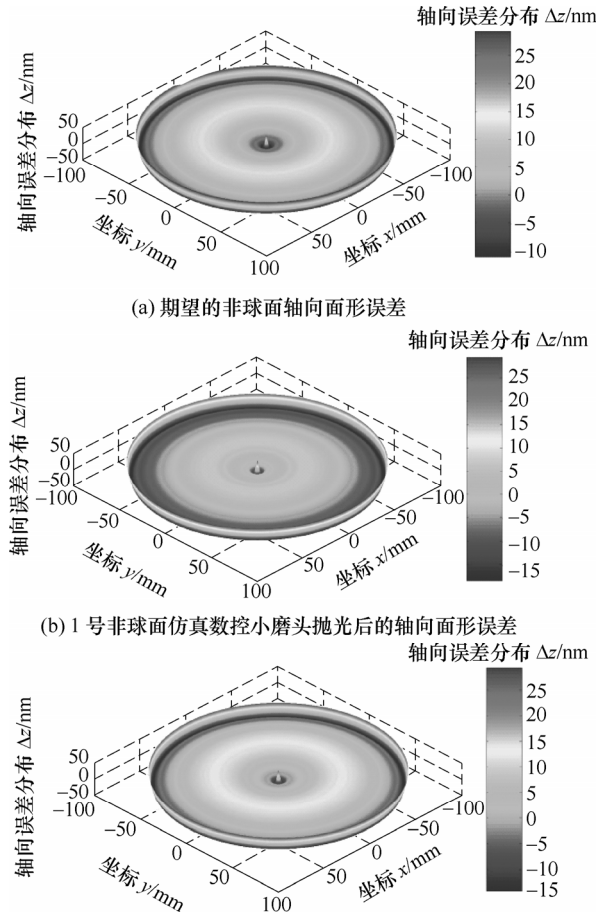


图8 数控小磨头抛光后非球面轴向误差空间分布

仿真加工后得到的最终的轴向面形误差和期望的轴向面形误差的偏差即为使用轴向误差法评价残余误差，执行确定性抛光加工而引起的加工误差。通过对比图7和图8可以发现，1号非球面经气囊抛光后引起的加工误差PV值为7.336 nm，经数控小磨头抛光后引起的加工误差PV值为7.454 nm；2号非球面经气囊抛光后引起的加工误差PV值为3.042 nm，经数控小磨头抛光后引起的加工误差PV值为3.147 nm。定义变量w为加工误差PV值相对于预期的轴向面形误差的百分比，则结合以上结果可以得到如图9所示的在初始误差一定的条件下，w和相对孔径η的关系。图9中1号非球面其相对孔径η=1/4，通过气囊抛光和数控小磨头抛光得到的加工误差占预期的非球面轴向面形误差的百分比

分别为 22.9%和 18.5%；2 号非球面其相对孔径  $\eta=1/15$ ，对应的  $w$  分别为 9.49%和 7.81%。

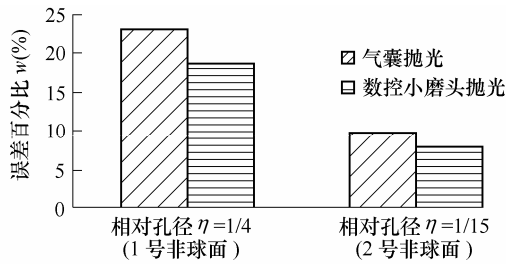


图9 误差百分比与相对孔径的关系

由图9的结果并结合图3可知，在初始残余误差一定的条件下，相对孔径越大的非球面，法向误差与轴向误差的差值越大，导致基于轴向误差法的残余误差评价方法引入的加工误差占预期的非球面轴向面形误差的百分比也越高。故在进行确定性抛光时，若非球面工件的相对孔径较小，则可以使用轴向误差法替代法向误差法作为残余误差的评价方法；若非球面工件的相对孔径较大，则必须使用法向误差法评价残余误差，否则将引入较大的加工误差。

## 4 结论

(1) 对确定性抛光中非球面的残余误差方法进行了研究，并提出了一种基于轴向残余误差计算法向残余误差的方法。

(2) 利用基于轴向残余误差计算出的法向残余误差，将二者进行对比，发现两者的偏差由非球面的中心往边缘呈逐渐增大的趋势，初始轴向残余误差越大的非球面所对应的二者的偏差也越大。

(3) 通过使用气囊抛光和数控小磨头抛光进行仿真试验分析，试验结果表明：不同非球面在初始残余误差一定的条件下，相对孔径越大的非球面，其法向残余误差与轴向残余误差的偏差越大。因此，进行确定性抛光时，若非球面工件的相对孔径较小，则可以使用轴向误差法替代法向误差法作为残余误差的评价方法；若非球面工件的相对孔径较大，则必须使用法向误差法评价残余误差，否则将引入较大的加工误差。这将为残余误差的确定提供一定的理论依据。

## 参 考 文 献

[1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
YANG Li. Advanced optical manufacture technology[M]. Beijing: Science Press, 2001.

[2] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 167-177.  
YUAN Julong, WU Zhe, LÜ Binghai, et al. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 167-177.

[3] 计时鸣, 杜学山, 陈国达, 等. 确定性抛光综述[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(6): 1-5.  
JI Shiming, DU Xueshan, CHEN Guoda, et al. Review on deterministic polishing[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(6): 1-5.

[4] JONES R A. Optimization of computer controlled polishing[J]. Appl. Opt., 1977, 16(1): 218-224.

[5] 王贵林, 戴一帆, 李圣怡. 光学非球面加工中研抛盘尺寸合理选择的研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 147-150.  
WANG Guilin, DAI Yifan, LI Shengyi. Research on the determination for the abrasive disk's dimension in aspheric optics machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(1): 147-150.

[6] BINGHAM R G, WALKER D D, KING D L, et al. A novel automated process for aspheric surfaces[C]// Current Developments in Lens Design and Optical Systems Engineering, August 2-4, 2000, San Diego, CA, United states. Bellingham: SPIE, 2000: 445-450.

[7] WALKER D D, BROOKS D, KING A, et al. The 'Precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. Optics Express, 2003, 11(8): 958-964.

[8] 张伟, 李洪玉, 金海. 气囊抛光去除函数的数值仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 308-312.  
ZHANG Wei, LI Hongyu, JIN Hai. Research on digital simulation and experiment of removal function of bonnet tool polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 308-312.

[9] 张峰, 余景池, 张学军, 等. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 1-8.  
ZHANG Feng, YU Jingchi, ZHANG Xuejun, et al. Magnetorheological finishing technology[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(5): 1-8.

[10] 彭小强, 戴一帆, 李圣怡. 磁流变抛光的材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 67-70.  
PENG Xiaoqiang, DAI Yifan, LI Shengyi. Material removal model of magnetorheological finishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 67-70.

- [11] XIE Xuhui, HAO Yu, ZHOU Lin, et al. High thermal expansion optical component machined by ion beam figuring[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 13401-13401-8.
- [12] 焦长君, 李圣怡, 王登峰, 等. 离子束加工光学镜面的材料去除特性[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1520-1526.  
JIAO Changjun, LI Shengyi, WANG Dengfeng, et al. Material removal property in ion figuring process for optical components[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(10): 1520-1526.
- [13] 郭培基, 方慧, 余景池. 液体喷射抛光技术研究[J]. *激光杂志*, 2008, 29(1): 25-27.  
GUO Peiji, FANG Hui, YU Jingchi. Research on material removal mechanism of fluid jet polishing[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(1): 25-27.
- [14] 张金平. 夏克-哈特曼波前传感器检测大口径非球面应用研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2012.  
ZHANG Jinping. Research on testing aspherical surface using Shack-Hartmann wavefront sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2012.
- [15] BURGE J H, ZHAO Chunyu. Applications of subaperture stitching interferometry for very large mirrors[C]// *Modern Technologies in Space- and Ground-Based Telescopes and Instrumentation II*, July 1-6, 2012, Amsterdam, Netherlands. Bellingham: SPIE, 2012: 84500X-1-84500X-11.
- [16] GARBUSI E, PRUSS C, OSTEN W. Interferometer for Precise and flexible asphere testing[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(24): 2973-2975.
- [17] JING H, KING C, WALKER D. Simulation and validation of a prototype swing arm profilometer for measuring extremely large telescope mirror-segments[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 2036-2048.
- [18] 李淑萍, 马春杰. 曲面测量中法向偏差的计算[J]. *计量技术*, 2002(2): 17-18.  
LI Shuping, MA Chunjie. Calculation of the normal direction deviation on curved surface[J]. *Measurement Technique*, 2002(2): 17-18.
- [19] 黄浩, 郭隐彪, 王振忠, 等. 轴对称非球面加工误差分离及补偿技术[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(12): 177-181.  
HUANG Hao, GUO Yinbiao, WANG Zhenzhong, et al. Error separation and compensation technology of axisymmetric aspheric machining[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 177-181.
- [20] 邓伟杰, 郑立功, 史亚莉, 等. 基于线性代数和正则化方法的驻留时间算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1009-1015.  
DENG Weijie, ZHENG Ligong, SHI Yali, et al. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1009-1015.

作者简介: 王春锦, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超精密加工装备及系统控制, 精密检测技术。

E-mail: wcj-2000@163.com

王振忠(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为精密加工装备及系统控制, 精密检测技术。

E-mail: wangzhenzhong@xmu.edu.cn