

## 激光与光电子学进展

## 一种采用双球面反射补偿检测高次非球面的研究

白茜<sup>1,2\*</sup>, 张煜邦<sup>1,2</sup>, 胡明勇<sup>1,2\*\*</sup>, 封志伟<sup>1,2</sup>, 徐剑锋<sup>1,2</sup>, 陈光宇<sup>1,2</sup>, 崔金龙<sup>1,2</sup><sup>1</sup>合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;<sup>2</sup>特种显示与成像技术安徽省技术创新中心, 安徽 合肥 230009

**摘要** 为了完成大口径高次非球面的面形精度检测,提出一种双球面反射式补偿检测系统设计方法。选择与边缘相切的球面为最佳比较球面,拟合出外径为 860 mm、中孔为 200 mm 的高次非球面镜的非球面梯度与法线像差。基于三级像差理论推导补偿检测系统公式,计算出初始参数分析补偿效果并改进优化得到最终结构。经光学软件仿真模拟系统波前差均方根(RMS)小于  $1/90\lambda$ ,经过公差分析,98% 结果波前差 RMS 小于  $1/40\lambda$ ,满足实际检测要求。该方法能够解决待检高次非球面镜无法检测的难题。

**关键词** 光学设计; 补偿检测; 双球面反射; 三级像差理论

中图分类号 O435.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220868

## Research on Detection of High-Order Aspheric Surfaces Using Double Spherical Reflection Compensation

Bai Qian<sup>1,2\*</sup>, Zhang Yubang<sup>1,2</sup>, Hu Mingyong<sup>1,2\*\*</sup>, Feng Zhiwei<sup>1,2</sup>, Xu Jianfeng<sup>1,2</sup>,  
Chen Guangyu<sup>1,2</sup>, Cui Jinlong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

<sup>2</sup>Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, Hefei 230009, Anhui, China

**Abstract** This study proposed a design method for a double spherical reflection compensation detection system to detect the surface accuracy of a large aperture high-order aspheric surface. A spherical surface tangent to the edge as the best-compared sphere was selected. The aspheric gradient and normal aberration of the high-order aspherical mirror was also fitted with an outer diameter of about 860 mm and a middle hole of about 200 mm. The formula of the compensation detection system was derived using the three-stage aberration theory, and was utilized to calculate the initial parameters, analyze the compensation effect, and improve and optimize the final structure. The wavefront root mean square of the system was less than  $1/90\lambda$  by optical software simulation, and 98% tolerance analysis results revealed that the wavefront is less than  $1/40\lambda$ , which meets the actual detection requirements. This method can solve the problem of inability to detect high-order aspherical mirrors to be inspected.

**Key words** optical design; compensation detection; double spherical reflection; third-order aberration

## 1 引言

大口径高次非球面镜在提高系统成像质量的同时能减少光学元件数量,因此在航空航天、大科学装置和民用高科技等领域都有重要应用<sup>[1-4]</sup>。高次非球面的面形参数自由度比二次非球面更多,能够更好地校正像差但检测难度也更大,因此国内外相关研究人员正致力于寻找到更有效的高次非球面检测方法<sup>[5-8]</sup>。孟晓辉等<sup>[9]</sup>用双透镜与单折射面的组合补偿方式检测

$\Phi 20$  mm 的高次非球面透镜。合肥工业大学赵础鑫等<sup>[10]</sup>设计双透镜补偿器检测 860 mm 口径的高次非球面反射镜。尽管目前常见的检测方法能够满足绝大部分非球面镜的检测需求,但若想以单一的检测方法应对大口径、大非球面度的高次非球面镜显然并不现实。本文采用外径 860 mm、中孔 200 mm 的待检镜,其顶点曲率半径为 1252.1 mm、二次项系数为 0.578、四次项系数为  $5.438 \times 10^{-11}$ 、六次项系数为  $3.737 \times 10^{-17}$ 。对于补偿器结构形式的选择:Dall 补偿器为平凸透镜,

收稿日期: 2022-02-02; 修回日期: 2022-03-04; 录用日期: 2022-03-29; 网络首发日期: 2022-04-10

通信作者: \*bqian\_97@163.com; \*\*humy8@126.com

单片透镜补偿能力有限,检测系统存在较大的像差;若采用 Offner 补偿器形式,使用两片补偿镜搭建检测系统,则波前像差均方根(RMS)值无法达到  $1/30\lambda$ ;若改进结构形式,则加入场镜后设计系统波前 RMS 可达到  $1/50\lambda$ ,但经公差分析,仅考虑场镜的加工误差就需低至纳米级,在实际检测过程中,难以保证光学元件加工和系统装调精度;待检镜法线像差大,采用 Maksutov 单反射式补偿器补偿精度低,达不到检测要求;计算机生成的全息图(CGH)补偿器可产生任意波前,检测精度高,但 CGH 补偿法检测成本较高不适用于大口径高次非球面检测。本文提出一种新的补偿器设计方法,根据零位补偿检验原理<sup>[11]</sup>,采用双球面反射系统补偿待检镜的轴向像差,经光学软件仿真及公差分析可知,该方法具有可行性。

## 2 设计方法

旋转轴对称非球面的表达式<sup>[12]</sup>为

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + a_1y^4 + a_2y^6 + a_3y^8 + a_4y^{10} + \dots + a_ny^{2n+2}, \quad (1)$$

式中: $k = -e^2$ 为二次项系数, $e$ 为偏心率; $c = 1/r_0$ , $r_0$ 为顶点曲率半径; $a_n$ 为偶次项系数。

待检镜为由微晶玻璃制成的高次凹非球面反射镜,其外径为 860 mm,中孔为 200 mm,顶点曲率半径  $r_0 = -1252.1$  mm,二次项系数  $k = 0.578$ ,四次项系数  $a_1 = 5.438 \times 10^{-11}$ ,六次项系数  $a_2 = 3.737 \times 10^{-17}$ 。代入已知参数得到待检镜的子午面截线为

$$x = \frac{(-1/1252.1)y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + 0.587)(-1/1252.1)^2y^2}} + 5.438 \times 10^{-11}y^4 + 3.737 \times 10^{-17}y^6. \quad (2)$$

通过数据拟合得出全口径的三维曲面如图 1 所示。非球面最佳比较球面的选取对于加工检测过程中

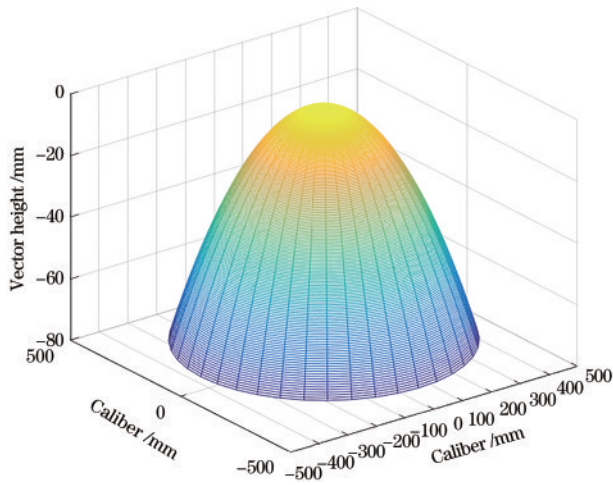


图 1 高次非球面镜三维曲面图

Fig. 1 Three-dimensional surface of high-order aspheric

的精度控制十分重要。对有中心遮拦的高次非球面,最佳球面应该只通过边缘点  $P_1(-3.997973, 100)$  和  $P_2(-75.562476, 430)$ ,表达式为

$$(x_1 - c_1)^2 + y_1^2 = (x_2 - c_1)^2 + y_2^2 = r_1^2. \quad (3)$$

计算得到  $c_1 = -1261.754802$  mm,  $r_1 = -1261.725901$  mm。

将式(1)与式(3)相减得到  $\Delta x$ ,计算得到最大非球面度为 0.0927 mm,拟合出非球面度梯度曲线如图 2 所示,法线像差如图 3 所示。可以看出,待检镜最大非球面梯度约为 0.0025,最大法线像差接近 90 mm。两反系统具有较高补偿能力的同时可缩短轴向尺寸,因此本文基于两反系统构建补偿器初始结构,根据三级像差理论可以计算得到初始数据。

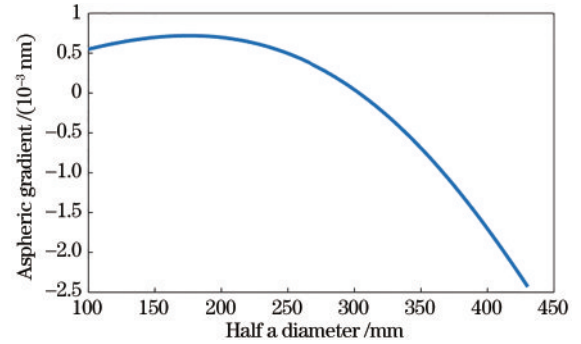


图 2 非球面梯度曲线

Fig. 2 Aspheric gradient curve

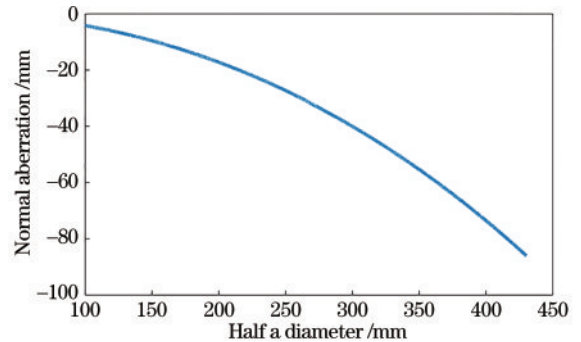


图 3 法线像差曲线

Fig. 3 Normal aberration curve

将式(1)与式(3)的六级级数展开,得到

$$x = \frac{y^2}{2r_0} + \left[ \frac{(1+k)}{8r_0^3} + a_1 \right] y^4 + \left[ \frac{(1+k)^2}{16r_0^5} + a_2 \right] y^6, \quad (4)$$

$$x = c_1 - r_1 + \frac{y^2}{2r_1} + \frac{y^4}{8r_1^3} + \frac{y^6}{16r_1^5}, \quad (5)$$

则  $\Delta x$  可表示为

$$\Delta x = \left( \frac{1}{2r_0} - \frac{1}{2r_1} \right) y^2 - (c_1 - r_1) + \left[ \frac{1-k}{8r_0^3} - \frac{1}{8r_1^3} + a_1 \right] y^4 + \left[ \frac{(1-k)^2}{16r_0^5} - \frac{1}{16r_1^5} + a_2 \right] y^6. \quad (6)$$

令  $y = h$ ,  $h$  为轴上光线在高次非球面的高度,则

高次非球面的波前差  $\Delta\omega$  可表示为

$$\Delta\omega = -(n' - n)\Delta x = -(n' - n)\left\{\left(\frac{1}{2r_0} - \frac{1}{2r_1}\right)h^2 - (c_1 - r_1) + \left[\frac{1-k}{8r_0^3} - \frac{1}{8r_1^3} + a_1\right]h^4 + \left[\frac{(1-k)^2}{16r_0^5} - \frac{1}{16r_1^5} + a_2\right]h^6\right\}, \quad (7)$$

式中:  $n$  为物方折射率;  $n'$  为像方折射率。已知赛德尔球差系数  $\Delta S_1$  为波前差  $\Delta\omega$  的 8 倍, 球面的球差系数为  $hp$ , 则高次非球面的球差系数  $S_1$  以参数  $p$  形式表示为

$$S_1 = hp + \Delta S_1 = hp - 8(n' - n)\left\{\left(\frac{1}{2r_0} - \frac{1}{2r_1}\right)h^2 - (c_1 - r_1) + \left[\frac{1-k}{8r_0^3} - \frac{1}{8r_1^3} + a_1\right]h^4 + \left[\frac{(1-k)^2}{16r_0^5} - \frac{1}{16r_1^5} + a_2\right]h^6\right\}, \quad (8)$$

式中:  $p = ni(i' - u)(i - i')$  为初级像差的参量,  $i$  入射孔径角,  $i'$  为出射孔径角,  $u$  为物方孔径角。

根据零位检验原理补偿器检测光路如图 4 所示, 补偿反射镜①和②组成补偿系统。O 点发出的激光依次经镜①、②沿法线方向射向待检高次非球面镜③后按原光路返回至 O 点, 形成自准直光路。 $h_i, u_i, u'_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别为光线在各个光学元件上的入射高度、入射孔径角和出射孔径角,  $\alpha_i = h_i/h_3$  ( $i = 1, 2$ ) 为两补偿镜相对于待检非球面的遮拦比,  $\beta_i = u_i/u'_i$  ( $i = 1, 2$ ) 为补偿镜的放大率, 系统总放大率为  $\beta = u_i/u'_3 = \beta_1\beta_2$ 。

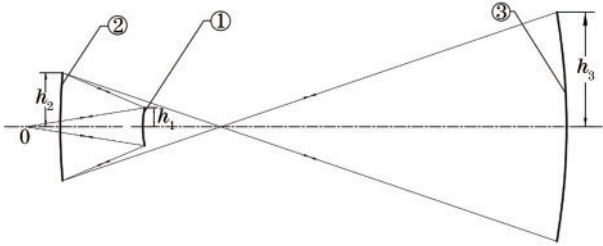


图 4 补偿检测光路

Fig. 4 Compensation detection optical path

按照光线经过各元件的顺序, 依次得到  $u'_1 = u_2$ ,  $u'_2 = u_3 = u'_3$ ,  $n_1 = 1$ ,  $n'_1 = n_2 = -1$ ,  $n'_2 = n_3 = 1$ ,  $n'_3 = -1$ 。根据零位检验原理, 补偿系统的消球差条件是整体球差系数为 0, 其中  $p_3 = 0$ 。为了方便计算, 将对系统做如下规划:  $h_3 = -1$ ,  $r_0 = -1$ ,  $r_1 = -1.007687$ ,  $c_1 = -1.00771$ ,  $u'_2 = u_3 = u'_3 = 1$ 。则整体球差系数表示为

$$0 = h_1 p_1 + h_2 p_2 + h_3 p_3 - 8(n'_3 - n_3)\left\{\left(\frac{1}{2r_0} - \frac{1}{2r_1}\right)h^2 - \frac{1}{2r_1}\right\}h^2 - (c_1 - r_1) + \left[\frac{1-k}{8r_0^3} - \frac{1}{8r_1^3} + a_1\right]h^4 + \left[\frac{(1-k)^2}{16r_0^5} - \frac{1}{16r_1^5} + a_2\right]h^6\right\} + h_1 p_1 + h_2 p_2, \quad (9)$$

代入上述参数式整理得:

$$\alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2 = \frac{1}{2}k^2 - 2k - 8(\alpha_1 + \alpha_2) + 0.070403. \quad (10)$$

引入像差分配比例系数  $m_1, m_2$ , 令  $m_1 + m_2 = 1$ , 则:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{m_1 \left[ \frac{1}{2}k^2 - 2k - 8(\alpha_1 + \alpha_2) + 0.070403 \right]}{\alpha_1} \\ p_2 = \frac{m_2 \left[ \frac{1}{2}k^2 - 2k - 8(\alpha_1 + \alpha_2) + 0.070403 \right]}{\alpha_2} \end{cases}. \quad (11)$$

对于反射镜①、②, 有

$$p = \left[ \frac{n'n(u' - u)}{n' - n} \right]^2 \left( \frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right). \quad (12)$$

代入镜①、②的参数得到

$$\begin{cases} p_1 = -\frac{1}{4}\beta_2^3(1 - \beta_1)^2(1 + \beta_1) \\ p_2 = -\frac{1}{4}(1 - \beta_2)^2(1 + \beta_2) \end{cases}. \quad (13)$$

设定补偿反射镜遮拦  $\alpha_1, \alpha_2$  和像差分配系数  $m_1, m_2$  可求得  $\beta_1, \beta_2$  相应的值。根据近轴公式  $\frac{n' - n}{r} = \frac{n'}{l'} - \frac{n}{l}$ , 对应补偿反射镜①、②的关系式为

$$\begin{cases} r_1 = \frac{h_1(n'_1 - n_1)}{n'_1 u'_1} = \frac{2\alpha_1}{\beta_2(1 + \beta_1)} \\ r_2 = \frac{h_2(n'_2 - n_2)}{n'_2 u'_2} = \frac{2\alpha_2}{(1 + \beta_2)} \end{cases}. \quad (14)$$

根据补偿系统光路计算各光学元件之间距离, 得到

$$\begin{cases} d_{01} = -l_1 = -\frac{h_1}{u_1} \\ d_{12} = -l_2 = -\frac{h_1 - h_2}{u'_1} \end{cases}, \quad (15)$$

式中:  $l_1$  为第一补偿镜物距;  $l_2$  为第二补偿镜物距。

由式(4)~(10)可以计算出参数, 按照轴向和径向比例进行缩放, 得到补偿检测系统的初始结构。

### 3 实例分析

根据上述计算方法设计补偿系统检测高次非球面镜, 设  $\alpha_1 = -0.1, \alpha_2 = -0.3, m_1 = -2, m_2 = 3$ , 得到

表 1 初始系统的结构数据  
Table 1 Structural data of initial system

Surface No.	Radius /mm	Thickness /mm	Semi-diameters /mm	Conic	Glass
0	-	800	-	0	-
1	123.541	-93.662	50.680	0	Mirror
2	222.355	1673.505	130.702	0	Mirror
3	-1252.100	-	429.974	0.578	-

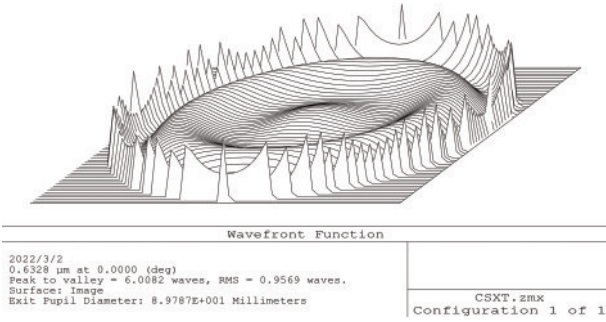


图 5 初始检测系统波前图

Fig. 5 Wavefront diagram of initial detection system

在补偿系统焦平面处加入场镜起到施密特校正板, 用来提高补偿能力。优化后所得补偿检测系统结构数据如表 2 所示。场镜材料为 K50 玻璃, 折射率为 1.522572。图 6 为补偿检测系统光路图。图 7 为补偿检

表 2 补偿检测系统结构数据

Table 2 Structural data of compensation detection system

Surface No.	Radius /mm	Thickness /mm	Semi-diameters /mm	Conic	Glass
0	-	500	-	0	-
1	173.444	-249.797	50.759	0	Mirror
2	453.264	742.469	218.210	0	Mirror
3	9.150	2.328	2.458	0.578	K50
4	8.579	1261.769	2.698	0	-
2	-1521.100	-	430.000	0	-

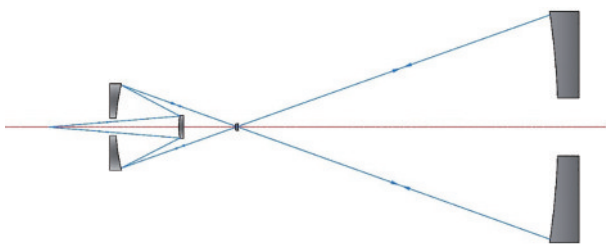


图 6 补偿检测系统光路图

Fig. 6 Light path diagram of compensation detection system

补偿检测系统初始结构, 初步优化后结构数据如表 1 所示。系统波前图如图 5 所示, 检测系统的波前差 RMS 值为 0.9569λ。

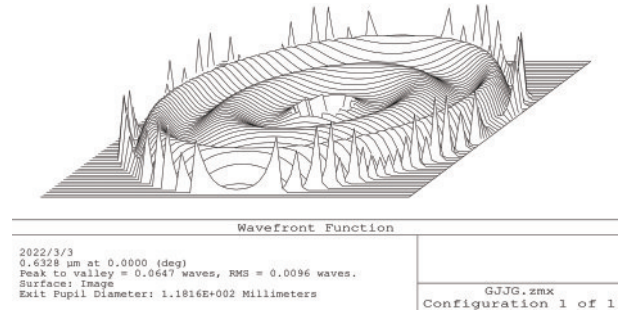


图 7 补偿检测系统波前图

Fig. 7 Wavefront diagram of compensation detection system

测系统波前图, 检测系统的峰谷 (PV) 值为 0.0647λ, RMS 为 0.0096λ。补偿系统设计结果满足 RMS 小于 1/30λ 的检测要求。系统点列图如图 8 所示, 弥散斑在艾里斑之内, 系统处于衍射极限状态。补偿检测系统采用双球面反射式结构存在中心挡光问题, 待检面光迹图如图 9 所示, 补偿检测系统有效检测区域为 Φ150~860 mm, 覆盖待检镜工作面, 不影响面形检测。

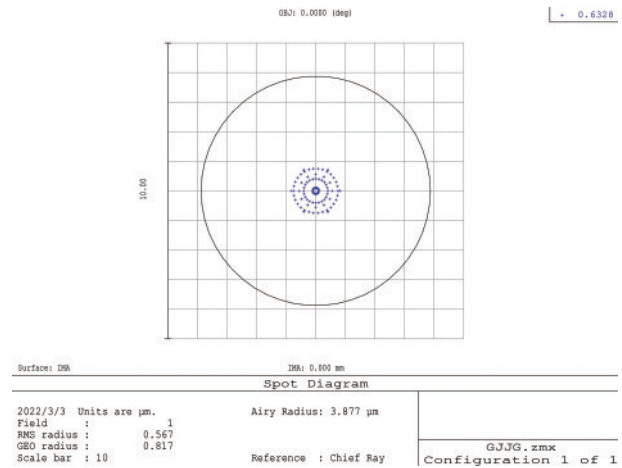


图 8 补偿检测系统点列图

Fig. 8 Spot diagram of compensation detection system

以待检高次非球面反射镜的光轴作为补偿检测系统装调基准, 无需考虑待检镜的偏心, 倾斜等装调误差。在检测过程中, 元件的中心间隔误差小于 ±0.02 mm, 偏心距离小于 ±0.02 mm, 倾斜角度小于 ±0.01°, 各

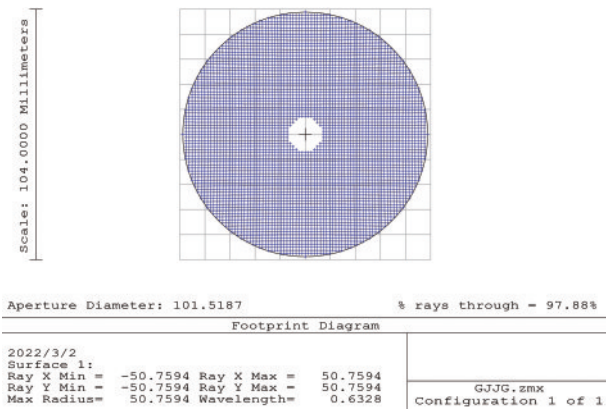


图 9 补偿检测系统光迹图

Fig. 9 Light trace diagram of compensation detection system

项公差在现有条件下均可检验<sup>[13]</sup>。考虑到光线在反射镜上反射两次,将反射镜的面形误差对检测系统精度的影响放大至两倍,并进行 5000 次蒙特卡罗分析,98% 结果波前差 RMS 小于  $1/40\lambda$ ,90% 结果波前差 RMS 小于  $1/40\lambda$ ,满足实际检测要求。通过公差分析得到各项制造公差参数,如表 3 所示。

表 3 制造公差参数

Table 3 Manufacturing tolerance parameters

Lens	Radius of curvature / mm	Angle of inclination / (°)	Thickness / mm	Surface irregularity / $\lambda$
Compensat or lens 1	$\pm 0.05$	$\pm 0.01$	-	1/20
Compensat or lens 2	$\pm 0.05$	$\pm 0.01$	-	1/20
Filed lens	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$	$\pm 0.01$	1/20

## 4 结 论

本文分析了大口径高次非球面镜面形特征,提出了一种双球面反射式补偿检测器设计方法。根据三级像差理论设计补偿系统参数,分析了初始补偿检测系统理论残留像差,添加场镜用于提高补偿能力,得到符合检测精度的补偿系统结构。所提方法能较好地补偿待检镜的法线像差,解决了待检镜面形检测的难题,为高次非球面检测系统设计提供了一种新的思路。

## 参 考 文 献

[1] 郝沛明. 非球面检验的辅助光学系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 5-29.  
Hao P M. Design of auxiliary optical system for aspheric surface inspection[M]. Beijing: Science Press, 2017: 5-29.

[2] 庞志海, 贺天兵. 一种大口径空间碎片广域探测光学系统: CN111897108A[P]. 2020-11-06.  
Pang Z H, He T B. Large-aperture space debris wide-area detection optical system: CN111897108A[P]. 2020-11-06.

[3] 杨振. 高次非球面相机成像系统设计与研究[D]. 长春:

长春工业大学, 2020: 25-32.  
Yang Z. Design and Research of High-Order Aspheric Camera and Imaging System[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020: 25-32.

[4] 赵鹏玮, 戚丽丽, 张金平, 等. 自准校正透镜位于共轭后点前的凹非球面检验[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 202202.  
Zhao P W, Qi L L, Zhang J P, et al. Testing of concave aspheric surface with self-collimating and correcting lens in front of back conjugate point[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 202202.

[5] 王军华. 长焦距高分辨率全景镜头设计[D]. 上海: 复旦大学, 2013: 20-28.  
Wang J H. Design of panoramic lens with long focal length and high resolution[D]. Shanghai: Fudan University, 2013: 20-28.

[6] 刘惠兰, 沙定国, 郝群, 朱秋东. 一种高次光学非球面度的计算方法[J]. 光电工程, 2004, 31(6): 44-47.  
Liu H L, Sha D G, Hao Q, et al. A method for calculating asphericity of high-order optical aspheric surface [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(6): 44-47.

[7] Hao Q, Tao X, Hu Y, et al. Interferometric measurement of high-order aspheric surface parameter errors based on a virtual-real combination iterative algorithm [J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27014-27030.

[8] 宋俊儒, 刘大礼, 邢辉. 环形高次非球面参数的测试[J]. 红外技术, 2019, 41(3): 290-296.  
Song J R, Liu D L, Xing H. Measurement of parameters of high-order aspheric ringy surface[J]. Infrared Technology, 2019, 41(3): 290-296.

[9] 孟晓辉, 王永刚, 李文卿, 等.  $\Phi 420$  mm 高次非球面透镜的加工与检测[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 3068-3075.  
Meng X H, Wang Y G, Li W Q, et al. Fabricating and testing of  $\Phi 420$  mm high-order aspheric lens[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 3068-3075.

[10] 赵超鑫, 胡明勇, 张少伟, 等. 大口径高次非球面补偿检测方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 072203.  
Zhao C C, Hu M Y, Zhang S W, et al. Research on compensation testing method for large-aperture and high-order aspheric surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072203.

[11] 马拉卡拉. 光学车间检测[M]. 万勇建, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012: 397-412.  
Malacara D. Optical shop testing[M]. Wang Y J, Transl. Beijing: China Machine Press, 2012: 397-412.

[12] 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: 1-8.  
Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 1-8.

[13] 李昭阳, 胡明勇, 白茜, 等. 一种非完善成像离轴三反装调补偿系统研究[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0422001.  
Li Z Y, Hu M Y, Bai Q, et al. Assembly-alignment and compensation of imperfect imaging off-axis three mirror system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0422001.