

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2024.01.005

高次凸非球面补偿检验方法研究

陈光宇¹, 胡明勇^{2*}, 杨传龙¹, 封志伟¹,
徐剑锋¹, 白茜¹, 崔金龙¹

(1 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2 合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 高次凸非球面镜是光学系统中至关重要的元件, 通常作为次镜来补偿光学系统的轴外像差, 但其检验方法一直是一大难点。基于背向零位检测方法, 提出利用三透镜与单折射面组合的形式来补偿高次非球面的法线像差。首先选取高次非球面的二次比较面来简化计算, 基于三级像差理论求解系统的初始结构, 对高次非球面的法线像差进行补偿, 使用ZEMAX软件仿真与优化后, 设计结果完全满足要求。随后结合一块有效通光口径为170 mm、顶点曲率半径为266.8 mm的高次凸非球面反射镜, 测得镜面的面形精度均方根为 0.019λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 满足实际检测要求, 验证了所提设计方法的可行性。此方法为大口径高次凸非球面的检验提供了一个新的思路。

关键词: 几何光学; 高次凸非球面; 零位补偿; 三级像差

中图分类号: TH703 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2024)01-00057-10

Research on compensation detection method for high-order convex aspheric surface

CHEN Guangyu¹, HU Mingyong^{2*}, YANG Chuanlong¹, FENG Zhiwei¹,
XU Jianfeng¹, BAI Qian¹, CUI Jinlong¹

(1 School of Instrument Science and Photoelectric Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2 Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The high-order convex aspherical mirror is a crucial element in the optical system, and usually used as a secondary mirror to compensate for the off-axis aberration of optical systems, however, its inspection method has always been a major challenge. The back-to-zero detection method is adopted, and a combination of three lenses and a single refractive surface is proposed to compensate for the normal aberration of the high-order aspheric surface. Firstly, the quadratic comparison surface of the high-order aspheric surface is selected to simplify the calculation. Based on the third-order aberration theory, the initial structure of the system is solved, and the normal aberration of the high-order aspheric surface is compensated. After simulation and optimization using ZEMAX software, it is shown that the design

作者简介: 陈光宇 (1996 -), 江苏常州人, 研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 18437955919@163.com

导师简介: 胡明勇 (1976 -), 安徽合肥人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事大口径、高精度光学系统方面的研究。E-mail: humy8@126.com

收稿日期: 2022-03-12; 修改日期: 2022-04-07

*通信作者。

results fully meet the requirements. And then, combined with a high-order convex aspheric reflector with an effective clear aperture of 170 mm and a vertex curvature radius of 266.8 mm, the root mean square of the mirror's surface shape accuracy is measured to be 0.019λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), which meets the actual detection requirements and verifies the feasibility of the proposed design method. This method provides a new idea for the inspection of large-diameter high-order convex aspheric surfaces.

Key words: geometric optics; high-order convex aspheric surface; zero compensation; third order aberration

0 引言

随着光学制造领域的不断发展,高次凸非球面普遍应用在各类大型空间光学系统中^[1]。对比目前应用最为广泛的二次凸非球面,高次凸非球面的优势在于其面形参数自由度更多,校正光学系统的高阶像差的效果更为优秀,能够更大程度地简化复杂光学系统结构^[2];其缺点也很明显,常用的二次曲面检测方法很难检验高次凸非球面。高效准确的高次凸非球面检验方法是其投入广泛使用的保证。

由于凸非球面对光线有发散作用,检测凸非球面面形时需要口径比待检镜大的球面镜辅助搭建检测光路,相对于同等口径凹非球面的检验,其方法更为复杂,更难实现^[3]。凸非球面的常用检测方法有透射式零位补偿法、计算全息法、无像差点法和子孔径检验法。透射式零位补偿法是将凸非球面镜的另一表面加工成工艺球面实现透镜的透射检测,常用于小口径凸非球面镜的检测。计算全息法检测凸非球面镜时,需要制造一块略大于待检镜的计算全息板以实现零位检测,但大口径高精度的检测样板制作困难、成本较高。无像差点法利用二次球面有两个共轭点的特性实现无像差检测,其中的Hindle法检验存在中心遮拦,辅助面镜的口径往往是待检镜的数倍,而改进的Simple-hindle法虽然在一定程度上缩小了辅助镜的口径,但对弯月镜的材料和工艺要求高,伴随凸非球面的口径增大,制造工艺难度指数增加。子孔径检验法受限于算法的不完善,有待长期发展^[4-6]。目前,对高次凸非球面检验方法的研究较为匮乏。北京空间机电研究所曾采用零位补偿与工艺球面结合的检验方法,实现对高次凸非球面透镜的检验^[7]。高次凸非球面透镜背部需要加工成标准球面,既增加了加工量,又不便后续复检;检测过程中要同时检测待检镜两面才能获得最终的面形精度,检测难度大。

本文主要解决大相对口径的高次凸非球面的检验问题,采用三透镜和单折射面组合的背向零位补偿方法进行检测^[8-11]。根据高次凸非球面的特性,计算其二次比较面,并基于三级像差理论推出初始结构,设计补偿器,有效补偿了高次非球面镜的法线像差。在实际检验中,结合一块石英玻璃材质的大相对口径高次凸非球面反射镜对本文所提出方法进行了验证。

1 实验方案设计

待检镜是一块大相对口径的凸高次非球面镜,法线像差复杂,检测难度高。考虑到待检镜采用石英材料,是可透的,可在高次凸非球面镀反射膜,使用透镜组和单折射面组合的背向零位检测方法进行检验。为了方便存储和复检需求,将其背面加工成标准平面,同时也节省了加工成本。大相对口径高次凸球面的法线像差极为复杂,双透镜组难以补偿,故采用三片式透镜组进行设计。所设计检验光路中,干涉仪发出的球面

波经过三片式透镜组从待检镜背后折射到高次凸非球面反射膜上,再由高次凸非球面内表面反射,沿原路返回之后与参考光形成干涉条纹,实现对高次凸非球面的检验。实验方案原理图如图 1 所示。

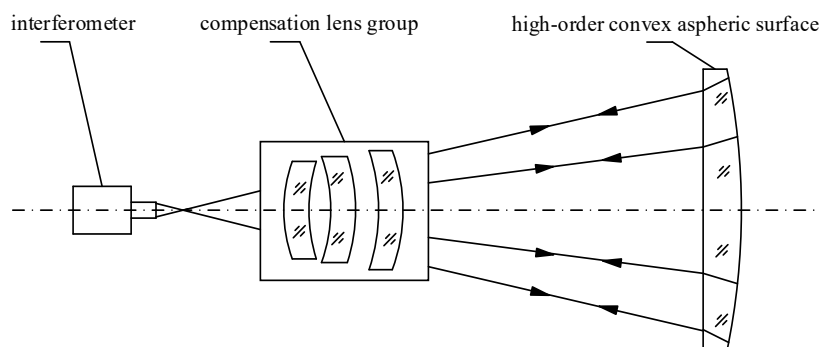


图 1 实验方案原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental scheme

1.1 高次非球面的二次比较面

对于常见形式的非球面,通常采用的面形方程表达式为^[12]

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2y^2}} + dy^4 + ey^6 + \dots, \quad (1)$$

式中: $c = 1/R_0$, R_0 为顶点曲率半径; K 为二次曲线常数; d 、 e 、 \dots 为高次非球面系数。高次凸非球面透镜的具体参数为: 口径 $D = 170$ mm, 顶点曲率半径 $R_0 = 266.8$ mm, 顶点偏心率 $K = 2.287$, 四次项系数 $d = -6.053 \times 10^{-11}$, 六次项系数 $e = -2.632 \times 10^{-14}$, 实际测量结果满足均方根值 $\text{RMS} \leq \lambda/50$ 的面形精度要求。

由于二次非球面比高次非球面有更完善准确的检验方法,一般选取高次非球面的某个二次比较面作为初始结构进行计算,由高次非球面对称边缘点 $A(x_a, y_a)$, 可解得二次比较面的偏心率为

$$e^2 = \frac{y_a^2 - 2R_0x_a}{x_a^2} + 1. \quad (2)$$

选取高次凸非球面全口径为 170 mm, 将 $y_a = D/2$ 代入 (1) 式求解 x_a 值。将 R_0 、 x_a 、 y_a 代入 (2) 式求解, 求得高次非球面二次比较面的 e^2 。

1.2 补偿检验系统设计

补偿检验光路原理图如图 2 所示, 1、2、3 为补偿透镜, 4 为辅助补偿单折射面, 5 为待检高次非球面。其中 u_i ($i=1 \sim 5$) 分别为光线经过每个光学镜片的入射角, u'_i 为光线经过每个光学镜片的出射角, h_i 分别为光线经过每个光学镜片的入射高度。 n_0 为材料折射率, n 为空气折射率, $\beta_1 = h_1/h_5$, $\beta_2 = h_2/h_5$, $\beta_3 = h_3/h_5$, $\beta_4 = h_4/h_5$ 和 $\alpha_1 = u_1/u'_1$, $\alpha_2 = u_2/u'_2$, $\alpha_3 = u_3/u'_3$, $\alpha_4 = u_4/u'_4$ 是三个补偿透镜和平凸透镜各自的放大率和遮拦比。 β 为系统总放大率, $r_1 \sim r_8$ 为各镜前后表面的曲率半径。

为简化计算,对系统进行如下规划: $h_5 = h_0 = -1$, $r_8 = r_0 = -1$, $u'_4 = u_5 = u'_5 = u_6 = u_0 = 1$, 其中 h_0 表示光线在高次非球面上的入射高度, r_0 为高次非球面顶点曲率半径, u_0 为高次非球面的入射角。

补偿检验系统的消球差条件为整个系统的球差系数和为 0^[13], 即

$$S_1 = \sum_{i=1}^4 h_i P_i + h_5 P_5 + h_5^3 K + \sum_{i=6}^9 h_i P_i' = 0, \quad (3)$$

式中: P_i 与 P_i' 表示光线正反向经过相应镜片时的初级球差参量, $K = -(n'_0 - n_0)e^2/r_0^3$ 。

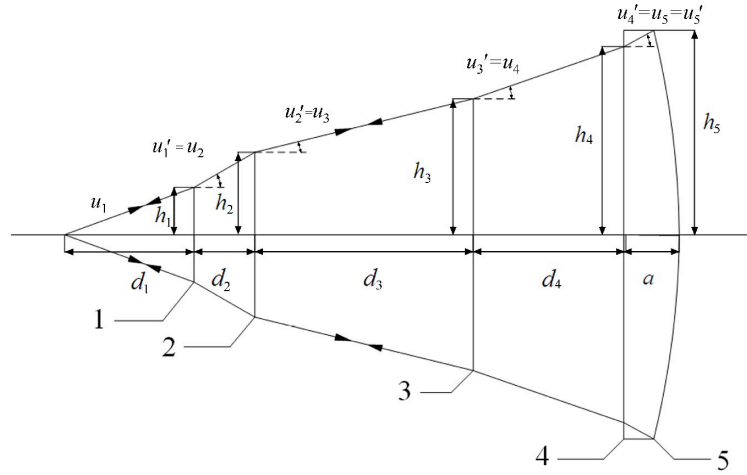


图2 补偿检验光路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of compensation detection optical path

对于正反向光路的补偿检验系统, 有 $P_i = P_i'$ 、 $P_5 = 0$ 、 $n'_0 = -n_0$, 所以(3)式可转化为

$$S_1 = 2h_1 P_1 + 2h_2 P_2 + 2h_3 P_3 + 2h_4 P_4 + n_0 e^2 = 0. \quad (4)$$

合理分配各个补偿镜对于高次非球面的像差所占比例 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{13} 和 m_{14} , 应当满足 $m_{11} + m_{12} + m_{13} + m_{14} = 1$, 整理可得

$$\begin{cases} P_1 = -\frac{m_{11} n_0 e^2}{\alpha_1} \\ P_2 = -\frac{m_{12} n_0 e^2}{\alpha_2} \\ P_3 = -\frac{m_{13} n_0 e^2}{\alpha_3} \\ P_4 = -\frac{m_{14} n_0 e^2}{\alpha_4} \end{cases}. \quad (5)$$

根据初级球差参量 P 值的定义, 求得

$$P_4 = n_0 \left(\frac{1 - \beta_4}{1 - n_0} \right)^2 (1 - n_0 \beta_3), \quad (6)$$

将(6)式代入单折射面的三级像差等式, 可得 β_4 的一元三次方程

$$n_0 \beta_4^3 - (2n_0 + 1) \beta_4^2 + (n_0 + 2) \beta_4 - 1 + \frac{m_{14} (1 - n_0)^2 e^2}{\alpha_4} = 0, \quad (7)$$

式中 e^2 、 n_0 已知, 通过设定 m_{14} 、 α_4 即可解出 β_4 。一般情况下, $0.1 \leq m_{14} \leq 0.3$, α_4 取决于待检镜的间距大小。

对于辅助面4, 应用近轴公式可得

$$r_7 = \frac{(n_0 - 1) \alpha_4}{n_0 - \beta_4} r_0, \quad (8)$$

由于光线穿过辅助面4的初始入射角等同于光线经过透镜1、2、3及辅助面4后的各偏角之和, 则

$$h\varphi = h_1\varphi_1 + h_2\varphi_2 + h_3\varphi_3 + h_4\varphi_4 = 1 - \beta. \quad (9)$$

为方便计算, 引入系数 m_{21} 、 m_{22} 、 m_{23} 、 m_{24} , 且 $m_{21} + m_{22} + m_{23} + m_{24} = 1$, 令

$$\begin{cases} h_1\varphi_1 = m_{21}(1 - \beta) \\ h_2\varphi_2 = m_{22}(1 - \beta) \\ h_3\varphi_3 = m_{23}(1 - \beta) \\ h_4\varphi_4 = m_{24}(1 - \beta) \end{cases}, \quad (10)$$

同时根据入射前后偏角的定义有

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{\beta_2\beta_3\beta_4(1 - \beta_1)}{h_1} \\ \varphi_2 = \frac{\beta_3\beta_4(1 - \beta_2)}{h_2} \\ \varphi_3 = \frac{\beta_4(1 - \beta_3)}{h_3} \\ \varphi_4 = \frac{1 - \beta_4}{h_4} \end{cases}. \quad (11)$$

计算补偿透镜 1、2、3 的初级球差参量规范化值 P'_1 、 P'_2 、 P'_3 , 可表示为

$$\begin{cases} P'_1 = \frac{P_1}{(h_1\varphi_1)^3} = \frac{m_{11}n_0e^2}{\alpha_1[m_{21}(1 - \beta)]^3} \\ P'_2 = \frac{P_2}{(h_2\varphi_2)^3} = \frac{m_{12}n_0e^2}{\alpha_2[m_{22}(1 - \beta)]^3} \\ P'_3 = \frac{P_3}{(h_3\varphi_3)^3} = \frac{m_{13}n_0e^2}{\alpha_3[m_{23}(1 - \beta)]^3} \end{cases}, \quad (12)$$

透镜 1、2、3 的折射率为 $n = 1.458464$, 其物体无穷远补偿透镜规划条件下的最小值为

$$P_0^\infty = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right], \quad (13)$$

透镜 1、2、3 的入射角规划值为

$$\begin{cases} v_1 = \frac{u_1}{h_1\varphi_1} = \frac{u_1}{u'_1 - u_1} = \frac{\beta}{m_{21}(1 - \beta)} \\ v_2 = \frac{u_2}{h_2\varphi_2} = \frac{u_2}{u'_2 - u_2} = \frac{\beta_2\beta_3\beta_4}{m_{22}(1 - \beta)} \\ v_3 = \frac{u_3}{h_3\varphi_3} = \frac{u_3}{u'_3 - u_3} = \frac{\beta_3\beta_4}{m_{23}(1 - \beta)} \end{cases}. \quad (14)$$

再根据补偿透镜 1、2 和 3 的弯曲 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 与规划值 P'_1 、 P'_2 、 P'_3 之间的关系, 计算可得

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{2n+2}{n+2} v_1 - \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \pm \sqrt{\left[P_1' - P_0^\infty + \frac{n}{n+2} (v_1 + v_1^2) \right] \frac{n}{n+2}} \\ Q_2 = \frac{2n+2}{n+2} v_2 - \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \pm \sqrt{\left[P_2' - P_0^\infty + \frac{n}{n+2} (v_2 + v_2^2) \right] \frac{n}{n+2}} \\ Q_3 = \frac{2n+2}{n+2} v_3 - \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \pm \sqrt{\left[P_3' - P_0^\infty + \frac{n}{n+2} (v_3 + v_3^2) \right] \frac{n}{n+2}} \end{cases} \quad (15)$$

根据弯曲 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 与曲率半径之间的关系, 计算出补偿镜各个面的曲率半径 $r_1 \sim r_6$ 、透镜之间的规范化间距 $d_1 \sim d_4$ 和高次凸非球面镜的厚度 a , 分别表示为

$$\begin{cases} c_1 = Q_1 + \frac{n}{n-1}, r_1 = \frac{1}{c_1 \varphi_1} \\ c_2 = Q_1 + 1, r_2 = \frac{1}{c_2 \varphi_1} \\ c_3 = Q_2 + \frac{n}{n-1}, r_3 = \frac{1}{c_3 \varphi_2} \\ c_4 = Q_2 + 1, r_4 = \frac{1}{c_4 \varphi_2} \\ c_5 = Q_3 + \frac{n}{n-1}, r_5 = \frac{1}{c_5 \varphi_3} \\ c_6 = Q_3 + 1, r_6 = \frac{1}{c_6 \varphi_3} \end{cases}, \quad (16)$$

$$\begin{cases} d_1 = -\frac{h_1}{u_1} = -\frac{h_1}{\beta} \\ d_2 = \frac{h_1 - h_2}{u_1'} \\ d_3 = \frac{h_2 - h_3}{u_2'} \\ d_4 = \frac{h_3 - h_4}{u_3'} \\ a = \frac{h_4 - h_5}{u_0} \end{cases} \quad (17)$$

由于弯曲程度 Q 与补偿镜的曲率半径 r 成反比, 曲率半径 r 越小带来的高级球差越大, 越难实现补偿检验, 因此补偿透镜的 Q 值应当尽可能取小。

2 实验结果与讨论

2.1 设计结果

由上文计算出补偿检验系统中顶点曲率半径和各面之间的规范化间距, 使用 ZEMAX 光学软件进行仿真分析, 设置待检非球面的表面类型为高次非球面, 玻璃有一定的初始厚度, 对初始结构进行优化, 得到满足设计要求的补偿检验系统。计算结果和优化后满足设计要求的补偿检验系统结构参数如表 1 所示, 括号内为计算数据。

表 1 补偿检验系统结构参数

Table 1 Structure parameters of compensation detection system

Surface	Actual (Calculated) radius/mm	Actual (Calculated) thickness/mm	Glass
OBJ	Infinity	258.457(356.241)	AIR
1	204.921(276.543)	13.000	SILICA
2	139.600(143.531)	17.200(33.784)	AIR
3	Infinity(1986.354)	18.000	SILICA
4	-116.110(-210.15)	90.800(115.278)	AIR
5	-74.341(-110.659)	15.000	SILICA
6	218.559(267.324)	41.336(62.350)	SILICA
7	Infinity(1545.621)	30.000(37.565)	SILICA
STO	-266.800	0.000	MIRROR

为更直观地看清具体结构, ZEMAX 仿真优化后的阴影模型图如图 3 所示。

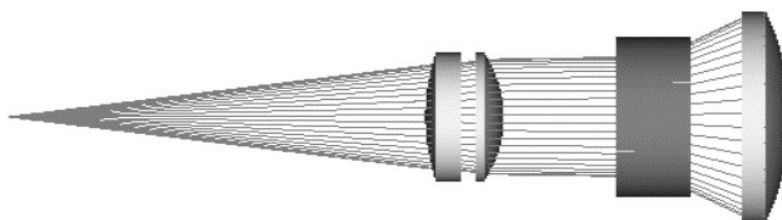


图 3 补偿检验系统阴影模型图

Fig. 3 Shaded model of compensation detection system

补偿检验系统采用可见光检验, 波长为 632.8 nm, 实际检验中可通过可见光斑位置变化快速进行粗略对焦。系统波前图如图 4 所示, 补偿检验系统理想的 PV 值为 0.0344λ , RMS 值为 0.0093λ 。点列图如图 5 所示, 弥散斑半径为 $2.002 \mu\text{m}$, 位于艾里斑内, 达到衍射极限, 整体设计完全满足要求。

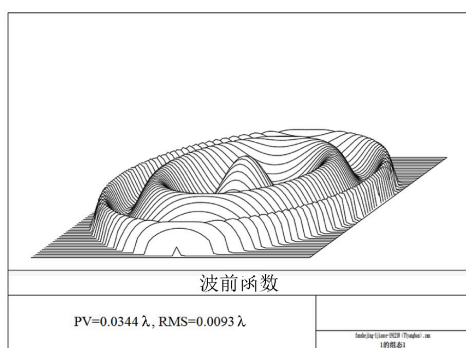


图 4 补偿检验系统波前图

Fig. 4 Wavefront diagram of compensation detection system

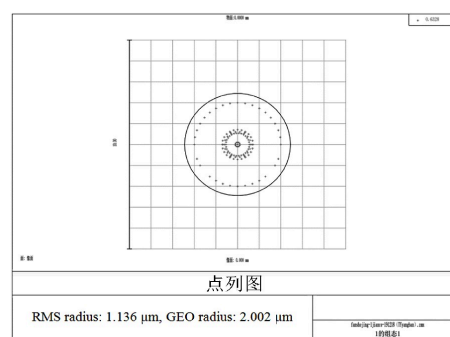


图 5 补偿检验系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of compensation detection system

2.2 公差分析

公差分析^[14]的基本流程如图 6 所示。首先选择评价方式, 给定一个公差基准并选择公差分析方法, 对补偿系统进行公差分析, 根据最坏偏离逐一修改公差, 直到确定满足要求的公差。

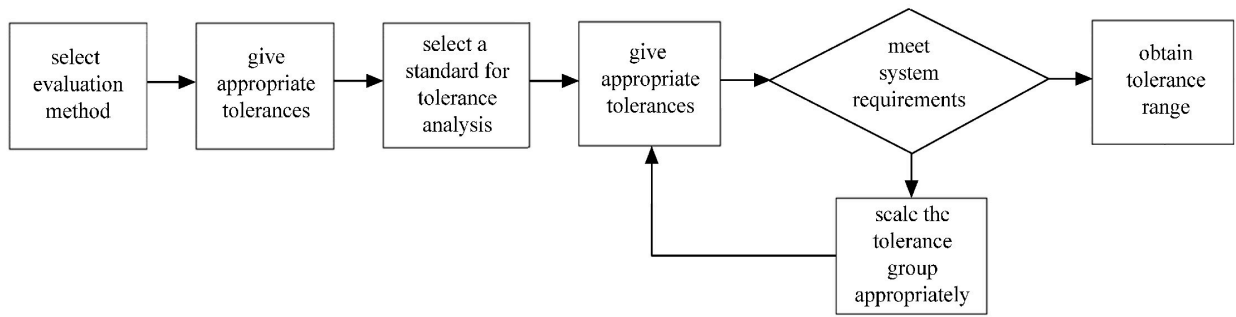


图6 公差分析流程图

Fig. 6 Flow chart of tolerance analysis

透镜表面公差参数如表2所示, 光学元件的公差参数如表3所示。

表2 透镜表面公差参数

Table 2 Tolerance parameters of lens surface

	Radius/mm	Thickness/mm	Decenter/mm	Tilt/(°)
Compensator 1 face	0.025	0.020	0.015	0.005
Compensator 2 face	0.015	0.020	0.015	0.005
Compensator 3 face	0.025	0.020	0.015	0.005

表3 元件公差参数

Table 3 Tolerance parameters of the components

	Decenter/mm	Tilt/(°)	Thickness/mm
Compensator 1	0.010	0.005	0.020
Compensator 1	0.010	0.005	0.020
Compensator 3	0.010	0.005	0.020

根据光学元件的表面公差参数和元件公差参数, 采用蒙特卡罗法分析模拟加工装配过程中的公差对实际效果的影响, 分析结果如表4所示。使用ZEMAX软件进行1000次蒙特卡罗分析, 90%的分析结果中波前均方根优于 0.01986121λ , 可见该补偿检验系统对此高次非球面的面形检测精度较高。

表4 蒙特卡罗法分析结果

Table 4 Analysis results using Monte-Carlo method

Sampling	RMS/ λ
98%	0.02667161
90%	0.01986121
80%	0.01637395
50%	0.01076413
20%	0.00652386
10%	0.00493724
2%	0.00285120

2.3 检验结果

高次凸非球面镜需先采用计算机数控抛光的加工方式, 利用高精度三坐标测量机将生成的数据面型拟合结果转化成计算机可识别的数据形式输入, 进行反复加工直至透镜面形达到预期精度, 后续还要采用传统的抛光技术来保证加工元件最终的面形^[15]。加工镀膜后的高次凸非球面镜实物图如图 7 所示。

检验系统中透镜组固定在定制的镜筒内, 装调难度大幅降低, 但对透镜组内部三个透镜间的定位误差提出了更高的要求。装调过程中首先要选择合适焦距的镜头, 镜头的选择依据为

$$f_1 = \frac{f_2}{D} d_1, \quad (18)$$

式中: f_2 为焦点到高次凸非球面镜的距离, D 为高次凸非球面镜的口径, f_1 为临界镜头焦距, d_1 为镜头口径。在实际应用中, 选取焦距小于 f_1 的镜头, 保证高次凸非球面全口径可检。利用干涉仪配合选好的镜头获取一束会聚光路, 将干涉仪焦点与补偿系统焦点进行对焦, 根据泽尼克系数的大小对装置进行细微调整, 直至获取满足要求的干涉图样。检测图样如图 8 所示, 高精度测量使得中频误差稍明显, 实际 PV 值为 0.170λ , RMS 为 0.019λ , 满足 $\text{RMS} \leq \lambda/50$ 的面形精度要求。



图 7 高次凸非球面镜实物图

Fig. 7 Picture of high-order convex aspherical mirror

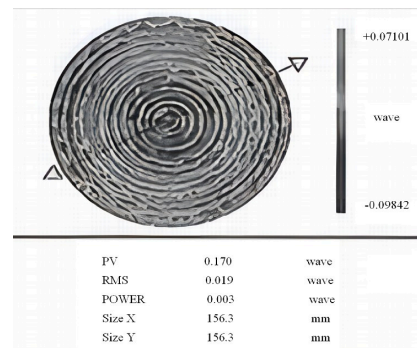


图 8 干涉图样

Fig. 8 Interference pattern

3 结 论

通过对一块口径为 170 mm 的高次凸非球面镜的检验, 验证了三透镜组合和背部透射混合补偿高次复杂法线像差的可行性。选取高次凸非球面的二次比较面简化初始结构的计算, 利用三级像差理论推导初始结构, 将求解数据代入 ZEMAX, 对补偿镜参数进行优化, 从而获取满足检验要求的仿真结果, RMS 理论极限为 0.0093λ 。实际操作中采用 ZYGO 干涉仪检测, 选择合适焦距的镜头对检验系统进行装调, 多次调试后获取符合要求的干涉图样, 实测 RMS 为 0.019λ , 满足 $\text{RMS} \leq \lambda/50$ 的面形精度要求。该方法对大相对口径高次凸非球面镜检测有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Liang Z J, Yang Y Y, Zhao H Y, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186.

梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用 [J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 161-186.

- [2] Cai Z H, Wang X K, Hu H X, *et al.* Non-null stitching test convex aspheric metal mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 268-273.
蔡志华, 王孝坤, 胡海翔, 等. 非零位拼接检测凸非球面金属反射镜 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 268-273.
- [3] Hu W Q, Ye L, Zhang J P, *et al.* Test method of convex aspheric reflector mirror [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2019, 36(3): 278-283.
胡文琦, 叶璐, 张金平, 等. 一种凸非球面反射镜的检验方法 [J]. 量子电子学报, 2019, 36(3): 278-283.
- [4] Zhao P W, Zhang J P, Ye L, *et al.* Catadioptric testing of large aperture convex hyperboloid surfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1122003.
赵鹏玮, 张金平, 叶璐, 等. 折反射检验大口径凸双曲面的研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1122003.
- [5] Qi L L, Zheng L H, Ye L, *et al.* Convex aspheric surface testing method using an autocollimation lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 107-113.
戚丽丽, 郑列华, 叶璐, 等. 自准校正单透镜检验凸非球面的方法研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 107-113.
- [6] Yao J G, Zheng L H, Hao P M. Hindle testing of convex aspheric double-lens with zero-focal power [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(3): 272-277.
姚劲刚, 郑列华, 郝沛明. 凸非球面无光焦度双透镜Hindle检验研究 [J]. 量子电子学报, 2017, 34(3): 272-277.
- [7] Meng X H, Wang Y G, Li W Q, *et al.* Fabricating and testing of Φ 420 mm high-order aspheric lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3068-3075.
孟晓辉, 王永刚, 李文卿, 等. Φ 420mm 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.
- [8] 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.
赵础鑫, 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.
- [9] Zheng L G, Wang X K, Xue D L, *et al.* Fabricating and testing of the large off-axis convex aspheric surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0722001.
郑立功, 王孝坤, 薛栋林, 等. 大口径离轴凸非球面的加工和检测 [J]. 光子学报, 2016, 45(7): 0722001.
- [10] Ma J, Zhu Z. Testing convex aspherical surfaces with optimized modified Hindle arrangement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 277-281.
马杰, 朱政. 改进的Hindle方法检测凸非球面的研究 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 277-281.
- [11] Yu D Y, Tan H Y. *Engineering Optics* [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 230-234.
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 第4版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 230-234.
- [12] Pan J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 4-5.
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: 4-5.
- [13] 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: 161-163.
- [14] Lv M, Hu M Y, Li Z Y, *et al.* Research on detection method of large relative caliber off-axis convex paraboloid [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(3): 287-293.
吕敏, 胡明勇, 李昭阳, 等. 大相对口径离轴凸抛物面检测方法研究 [J]. 量子电子学报, 2020, 37(3): 287-293.
- [15] 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.
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.