

大口径高次非球面补偿检测方法的研究

赵础矗^{1**}, 胡明勇^{1*}, 张少伟², 李兴隆², 李昭阳¹

¹合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

²上海航天控制技术研究所, 上海 201109

摘要 大口径高次非球面的加工检测是光学制造的难题之一。结合一个有效通光口径为 900 mm、顶点曲率半径为 2580 mm 的高次非球面凹反射镜, 推导出高次非球面的球差系数。基于三级像差理论, 对高次非球面的法线像差进行补偿, 求解了补偿系统的初始结构。设计了基于球面波和平面波的补偿系统, 并对高次非球面凹反射镜进行研磨处理, 经四维(4D)干涉仪检测得到其面型精度为 0.022λ , 满足实际测量要求。

关键词 高次非球面; 三级像差; 补偿检测; 法线像差

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.072203

Research on Compensation Testing Method for Large-Aperture and High-Order Aspheric Surface

Zhao Chuchu^{1**}, Hu Mingyong^{1*}, Zhang Shaowei², Li Xinglong², Li Zhaoyang¹

¹Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

²Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China

Abstract One of the difficult problems in optical manufacturing is to process and test large aperture and high-order aspheric surface. The spherical aberration coefficient of a high-order aspheric concave mirror with an effective aperture of 900 mm and a radius of curvature of 2580 mm was derived. Based on third-order aberration theory, the normal aberration of the high-order aspheric surface was compensated, and the initial structure of the compensation system was solved. Compensation systems based on spherical wave and plane wave were designed respectively, and the high-order aspheric concave mirrors were polished. The accuracy of the surface shape measured by four-dimensional interferometer is 0.022λ which meets the actual measurement requirements.

Key words high-order aspheric surface; third-order aberration; compensation detection; normal aberration

OCIS codes 220.1250; 220.3620; 220.4610

1 引言

大口径光学系统因具有高成像分辨率、强集光能力, 广泛应用于天文望远镜、空间成像系统等领域中^[1]。随着光学加工技术的不断进步, 大口径非球面在光学系统^[2]中的应用也越来越多。与二次非球面反射镜相比, 高次非球面反射镜的面形参数自由度更多^[3], 能有效校正光学系统的各阶像差, 简化光学系统的结构^[4]。

高次非球面的应用, 取决于能否找到有效的检验方案^[5]。通常采用无接触检验, 即利用高次非球

面的二次比较面作为参考计算, 再代入 Zemax 进行优化^[6]; 而本文根据高次非球面的特性, 推导出高次非球面的球差系数, 基于三级像差理论, 推出补偿初始结构, 设计补偿器, 搭建检验光路, 有效补偿了高次非球面的法线像差。

已有研究表明采用透射式零位补偿检验最为合适^[7], 本文实验中使用的的高次非球面凹反射镜参数: 口径为 900 mm, 顶点曲率半径为 2580 mm, 顶点偏心率为 1.924, 四次项系数为 -7.152×10^{-12} , 六次项系数为 4.471×10^{-19} , 材料为微晶玻璃, 满足实际中的测量要求, 即面形精度方均根(RMS)小于等于

收稿日期: 2019-10-28; 修回日期: 2019-11-01; 录用日期: 2019-11-14

* E-mail: humy8@126.com; ** E-mail: 315356133@qq.com

$\lambda/40(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。

2 求解过程

2.1 高次非球面的面形公式

在 Zemax 中,偶次旋转对称非球面可表示为^[8]

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

式中, $c=1/r_0$ 为顶点曲率, r_0 为顶点曲率半径。 $K=-e^2$, e^2 为偏心率, K 为二次项系数, a_n 为以4开始的偶次项系数。

2.2 高次非球面的二次比较面

由于二次比较面比其他高次非球面有更准确的检验方法,选取某个高次非球面的二次比较面作为初始结构进行计算^[9],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 e_0^2 ^[9]

$$e_0^2 = \frac{y_a^2 - 2r_0x_a}{x_a^2} + 1. \quad (2)$$

将 $A(-38.9898, 450)$ 代入(2)式得 $e_0^2 = 1.8635$, $K_0 = -e_0^2 = -1.8635$,再代入(1)式得

$$\Delta x = \left[\frac{(1+K)-1}{8r_0^3} + a_1 \right] y^4 + \left[\frac{(1+K)^2-1}{16r_0^5} + a_2 \right] y^6 + \left\{ \frac{5[(1+K)^3-1]}{128r_0^7} + a_3 \right\} y^8 + \left\{ \frac{7[(1+K)^4-1]}{256r_0^9} + a_4 \right\} y^{10}. \quad (7)$$

Δx 引起的附加光程差为

$$\Delta l = (n - n') \Delta x, \quad (8)$$

式中, n 为光线入射的折射率, n' 为光线出射的折射率。

令 $y=h$, h 为轴上光线在高次非球面的高度,则高次非球面产生的波面与理想波面间的光程差即高次非球面的波前差,可表示为

$$\Delta W = -(n' - n) \left\{ \left[\frac{(1+K)-1}{8r_0^3} + a_1 \right] h^4 + \left[\frac{(1+K)^2-1}{16r_0^5} + a_2 \right] h^6 + \left\{ \frac{5[(1+K)^3-1]}{128r_0^7} + a_3 \right\} h^8 + \left\{ \frac{7[(1+K)^4-1]}{256r_0^9} + a_4 \right\} h^{10} \right\}. \quad (9)$$

根据波前差和赛德尔球像差系数 ΔS_1 的关系

$$\Delta W = \frac{1}{8} \Delta S_1, \quad (10)$$

$$\Delta S_1 = -8(n' - n) \left\{ \left[\frac{(1+K)-1}{8r_0^3} + a_1 \right] h^4 + \left[\frac{(1+K)^2-1}{16r_0^5} + a_2 \right] h^6 + \left\{ \frac{5[(1+K)^3-1]}{128r_0^7} + a_3 \right\} h^8 + \left\{ \frac{7[(1+K)^4-1]}{256r_0^9} + a_4 \right\} h^{10} \right\}. \quad (11)$$

球面的球差系数为 hP ,因此高次非球面的球差系数为 $S_1 = hP + \Delta S_1$,即

$$S_1 = hP - 8(n' - n) \left\{ \left[\frac{(1+K)-1}{8r_0^3} + a_1 \right] h^4 + \left[\frac{(1+K)^2-1}{16r_0^5} + a_2 \right] h^6 + \left\{ \frac{5[(1+K)^3-1]}{128r_0^7} + a_3 \right\} h^8 + \left\{ \frac{7[(1+K)^4-1]}{256r_0^9} + a_4 \right\} h^{10} \right\}, \quad (12)$$

$$x = \frac{-y^2}{2580[1 + \sqrt{1 - (1 - 1.8635) \times (1/2580^2)y^2}]^2}. \quad (3)$$

2.3 高次非球面的球差系数求解

将(1)式进行泰勒展开到十阶,得到

$$x = \frac{y^2}{2r_0} + \left[\frac{(1+K)}{8r_0^3} + a_1 \right] y^4 + \left[\frac{(1+K)^2}{16r_0^5} + a_2 \right] y^6 + \left[\frac{5(1+K)^3}{128r_0^7} + a_3 \right] y^8 + \left[\frac{7(1+K)^4}{256r_0^9} + a_4 \right] y^{10}. \quad (4)$$

过坐标原点与高次非球面相切的球面方程为

$$y^2 = 2r_0x_{\text{sph}} - x_{\text{sph}}^2, \quad (5)$$

式中, x_{sph} 为以 r_0 为半径的球面方程的横坐标,将(5)式进行泰勒展开到第十阶,得到

$$x_{\text{sph}} = \frac{y^2}{2r_0} + \frac{y^4}{8r_0^3} + \frac{y^6}{16r_0^5} + \frac{5y^8}{128r_0^7} + \frac{7y^{10}}{256r_0^9}. \quad (6)$$

将(4)式与(6)式相减,得

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

2.4 补偿检测系统求解

图 1 和图 2 分别为基于球面波和平面波的光学补偿系统图。其中, 光在空气中传播折射率为 1, n 为透镜材料的折射率。第一个透镜的光线入射高度为 h_1 , 入射孔径角为 u_1 , 出射孔径角为 u'_1 。第二个透镜的入射高度为 h_2 , 入射孔径角为 u_2 , 出射孔径

角为 u'_2 。待检测的高次非球面的入射高度为 h_3 , 入射孔径角为 u_3 , 出射孔径角为 u'_3 , 顶点曲率半径为 r_0 。第一个补偿系统透镜相对于检测非球面镜的遮拦比 $\alpha_1 = \frac{h_1}{h_3}$ 及放大率 $\beta_1 = \frac{u_1}{u'_1}$ 。第二个补偿系统透镜相对于检测非球面镜的遮拦比 $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_3}$ 及放大率 $\beta_2 = \frac{u_2}{u'_2}$, 补偿系统总的放大率 $\beta = \frac{u_1}{u'_1}$ 。

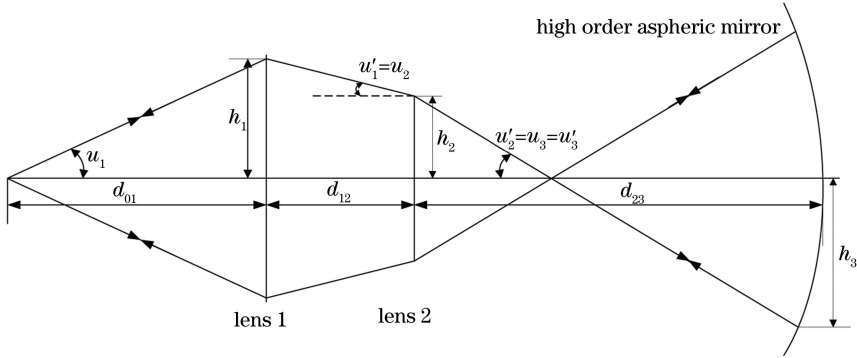


图 1 基于球面波的光学补偿系统图

Fig. 1 Optical compensation system diagram based on spherical wave

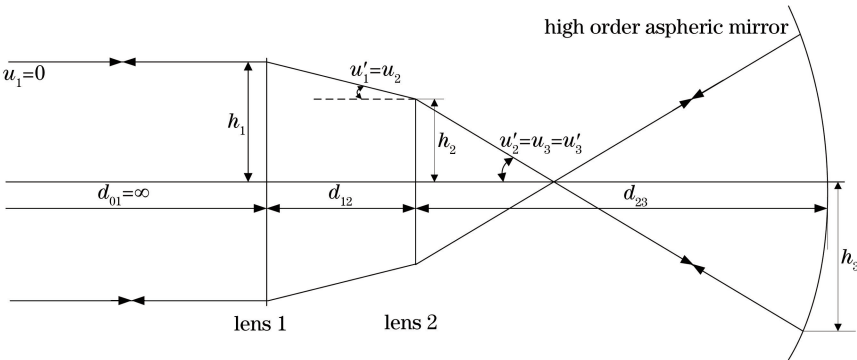


图 2 基于平面波的光学补偿系统图

Fig. 2 Optical compensation system based on plane wave

为了方便初始结构计算, 设 $h_3 = -1, r_0 = -1, u'_2 = u_3 = u'_3 = 1$, 按照光线的入射高度正负规定 $h_1 > 0, h_2 > 0, -1 < \alpha_1 < 0, -1 < \alpha_2 < 0$ 。

根据三级像差理论和补偿原理可知, 系统的整体球差系数为 0, 其中 $P_3 = 0, P_1$ 和 P_2 分别为第一个透镜和第二个透镜的 P 值。

$$\sum S_1 = h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_3 P_3 - 8(n' - n) \left\{ \left[\frac{(1+K) - 1}{8r_0^3} + a_1 \right] h_3^4 + \left[\frac{(1+K)^2 - 1}{16r_0^5} + a_2 \right] h_3^6 + \left\{ \frac{5[(1+K)^3 - 1]}{128r_0^7} + a_3 \right\} h_3^8 + \left\{ \frac{7[(1+K)^4 - 1]}{256r_0^9} + a_4 \right\} h_3^{10} \right\} + h_2 P_2 + h_1 P_1 = 0. \quad (13)$$

代入参数后得

$$\frac{h_1}{h_3} P_1 + \frac{h_2}{h_3} P_2 = \frac{32K + 16(1+K)^2 + 10(1+K)^3 + 7(1+K)^4 - 33 - 256(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)}{32}. \quad (14)$$

将(14)式改写为

$$\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 = M, \quad (15)$$

$$M = \frac{32K + 16(1+K)^2 + 10(1+K)^3 + 7(1+K)^4 - 33 - 256(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)}{32}. \quad (16)$$

引入比例因子 m_1 和 m_2 , $m_1 + m_2 = 1$, 可得

$$\begin{cases} P_1 = \frac{m_1}{\alpha_1} M \\ P_2 = \frac{m_2}{\alpha_2} M \end{cases}. \quad (17)$$

对应透镜光线偏角 $h_1\varphi_1$ 和 $h_2\varphi_2$ 和补偿系统总偏光线角 $h\varphi$ ^[10]

$$\begin{cases} h_1\varphi_1 = u'_1 - u_1 = u'_1(1 - \beta_1) = u'_2\beta_2(1 - \beta_1) = \beta_2(1 - \beta_1) \\ h_2\varphi_2 = u'_2 - u_2 = u'_2(1 - \beta_2) = 1 - \beta_2 \\ h\varphi = h_1\varphi_1 + h_2\varphi_2 = u'_2 - u_1 = u'_2(1 - \beta) = 1 - \beta \end{cases}, \quad (18)$$

式中, φ_1 和 φ_2 分别为对应补偿镜的光焦度, 规划后的 P'_1, P'_2 可表示为

$$\begin{cases} P'_1 = \frac{P_1}{(h_1\varphi_1)^3} = \frac{m_1 M}{\alpha_1 \beta_2^3 (1 - \beta_1)^3} \\ P'_2 = \frac{P_2}{(h_2\varphi_2)^3} = \frac{m_2 M}{\alpha_2 (1 - \beta_2)^3} \end{cases}. \quad (19)$$

规划后的 P'_1, P'_2 与其弯曲 Q_1, Q_2 的关系为

$$\begin{cases} P'_1 = P_0^\infty - \frac{n}{n+2}(u_1 + u_1^2) + \frac{n+2}{n} \left[Q_1 + \frac{3n}{2(n-1)(n-2)} - \frac{2n+2}{n+2} u_1 \right]^2 \\ P'_2 = P_0^\infty - \frac{n}{n+2}(u_2 + u_2^2) + \frac{n+2}{n} \left[Q_2 + \frac{3n}{2(n-1)(n-2)} - \frac{2n+2}{n+2} u_2 \right]^2 \end{cases}, \quad (20)$$

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{2n+2}{n+2} u_1 - \frac{3n}{2(n-1)(n-2)} \pm \sqrt{\left[P'_1 - P_0^\infty + \frac{n}{n+2}(u_1 + u_1^2) \right] \frac{n}{n+2}} \\ Q_2 = \frac{2n+2}{n+2} u_2 - \frac{3n}{2(n-1)(n-2)} \pm \sqrt{\left[P'_2 - P_0^\infty + \frac{n}{n+2}(u_2 + u_2^2) \right] \frac{n}{n+2}} \end{cases}, \quad (21)$$

$$\begin{cases} u'_1 = \frac{u_1}{h_1\varphi_1} = \frac{\beta_1}{1 - \beta_1} \\ u'_2 = \frac{u_2}{h_2\varphi_2} = \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} \end{cases}, \quad (22)$$

式中, P_0^∞ 是 P^∞ 的极小值, u'_1, u'_2 分别为入射孔径角 u_1, u_2 的规划值。通过(23)式, 可求得第一个透镜曲率半径 $r_{1,1}, r_{1,2}$, 第二个补偿透镜曲率半径 $r_{2,1}, r_{2,2}$ 为

$$\begin{cases} r_{1,1} = 1 / \left[\left(Q_1 + \frac{n}{n-1} \right) \varphi_1 \right], \\ r_{1,2} = 1 / \left[(Q_1 + 1) \varphi_1 \right], \\ r_{2,1} = 1 / \left[\left(Q_2 + \frac{n}{n-1} \right) \varphi_2 \right], \\ r_{2,2} = 1 / \left[(Q_2 + 1) \varphi_2 \right] \end{cases}. \quad (23)$$

因在设计时不考虑透镜厚度, 即认为透镜厚度为 0, 则面与面之间的距离为

$$\begin{cases} d_{01} = -\frac{h_1}{u_1} \\ d_{12} = \frac{h_1 - h_2}{u'_1} = \frac{h_1 - h_2}{u'_1}, \\ d_{23} = \frac{h_2 - h_3}{u'_2} = h_2 - h_3 \end{cases}, \quad (24)$$

式中, d_{01} 为光源到透镜 1 距离, d_{12} 为透镜 1 到透镜 2 之间的距离, d_{23} 为透镜 2 到待检测镜的距离。

3 设计结果及分析

3.1 点光源检验补偿系统结构

根据(13)式~(24)式计算出基于球面波初始补偿系统结构参数,如表 1 所示。

表 1 基于球面波初始补偿系统结构参数

Table 1 Structural parameters of initial compensation system based on spherical wave

Radius /mm	Thickness /mm	Medium	Diameter /mm
∞	572.330	air	3.000
-720.120	0.000	silica	94.230
-104.030	180.190	air	93.230
320.150	0.000	silica	60.120
-450.000	2770.250	air	60.120
-2580.000	-2761.734	mirror	900.000

在 Zemax 中设置面型为偶数型非球面 (Even

asphere)^[11], 通过改变补偿镜曲率半径、中心间隔, 加厚镜片进一步校正高级像差。表 2 是基于球面波优化后的设计结果。图 1 是点光源检验补偿系统光路。

表 2 基于球面波优化后的补偿系统结构参数

Table 2 Structural parameters of optimized compensation system based on spherical wave

Radius /mm	Thickness /mm	Medium	Diameter /mm
∞	568.893	air	3.000
-717.000	13.448	silica	94.654
-107.150	165.577	air	95.268
300.600	10.900	silica	55.244
-448.996	2761.734	air	53.370
-2580.000	-2761.734	mirror	900.000

优化后的系统的点列图、波像差如图 3 所示。在 0° 视场时 (OBJ), 得到系统弥散斑半径为 $0.377 \mu\text{m}$, 波面峰值和谷值的差值 PV 为 0.0043λ , 平均波面 RMS 值为 0.0013λ , 设计结果完全满足检测要求即 $\lambda/40$ 。

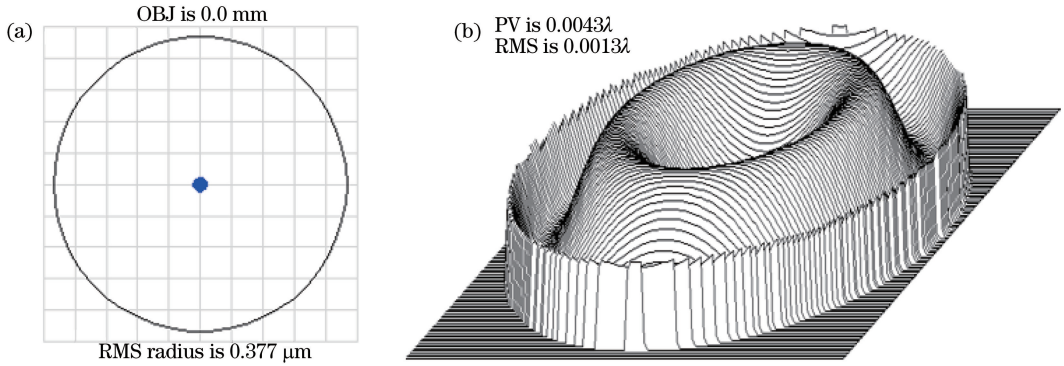


图 3 基于球面波的光学补偿系统的点列图和波前图。(a)点列图;(b)波前图

Fig. 3 Spot diagram and wavefront diagram of optical compensation system based on spherical wave.

(a) Spot diagram; (b) wavefront diagram

3.2 平面波检验补偿系统结构

设 $u_1=0$, 由(13)式~(24)式计算出平面波的初始结构尺寸,如表 3 所示。

表 3 基于平面波的初始补偿系统结构参数

Table 3 Structural parameters of initial compensation system based on plane wave

Radius /mm	Thickness /mm	Medium	Diameter /mm
∞	∞	air	-
-800.000	0.000	silica	160.000
-245.130	300.000	air	160.000
180.670	0.000	silica	83.000
280.430	2850.300	air	83.000
-2580.000	-2850.300	mirror	900.000

为了分析和优化方便,在 Zemax 优化时需要在像面前加一个近轴面 (Paraxial plane)^[11] 作为理想

薄透镜,来模拟无焦系统成像。表 4 为基于平面波的设计结果。

表 4 基于平面波优化后的补偿系统结构参数

Table 4 Structural parameters of optimized compensation system based on plane wave

Radius /mm	Thickness /mm	Medium	Diameter /mm
∞	∞	air	-
-791.480	32.524	silica	157.570
-241.580	266.917	air	159.136
176.710	21.622	silica	83.846
270.000	2834.374	air	76.738
-2580.000	-2761.734	mirror	900.000

用 Zemax 优化后,从图 4 中可以看出,在 0° 视场时, PV 为 0.0317λ , RMS 为 0.0055λ 。

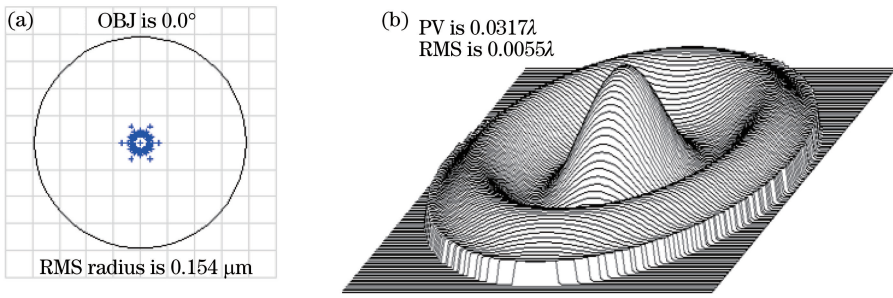


图 4 基于平面波的光学补偿系统的点列图和波前图(a)点列图;(b)波前图

Fig. 4 Spot diagram and wavefront diagram of optical compensation system based on plane wave.

(a) Spot diagram; (b) wavefront diagram

3.3 实验结果

由图 3 和图 4 可见,基于球面波的补偿系统和基于平面波的补偿系统的设计精度都能满足检测要求。从搭建光路的难易分析,平面波检测光路,在 x 方向减少了一个维度,所以搭建相对容易。从实际装调过程分析,装调过程中自准直反射光需要被获取。由于 4D PhaseCam 6000 功率较小^[12],平面波能量分散,无法观察到平面波具体返回的位置,而球

面波自准直后反射光会聚成一个亮点,更容易观察,所以与基于平面波补偿系统相比,基于球面波的光学补偿系统能更好实现干涉仪的精检测,且方便检测和修磨。如表 5 所示,根据加工后实测的真实数据,调整前后截距。如图 5 所示,按照表 5 调整后的光学补偿系统搭建光路,对研磨后的高次非球面反射镜检测,实验结果显示 PV 值为 0.13015λ ,RMS 值为 0.0220λ ,满足检测要求。

表 5 实测补偿系统的结构参数

Table 5 Structural parameters of measured compensation system

Theoretical value		Actual value	
Radius /mm	Thickness /mm	Radius /mm	Thickness /mm
∞	568.893	∞	569.398
-717.000	13.448	-717.332	13.412
-107.150	165.577	-107.158	164.808
300.600	10.900	300.603	11.018
-448.996	2761.734	-448.932	2761.740
-2580.000	-2761.734	-2580.000	2761.740

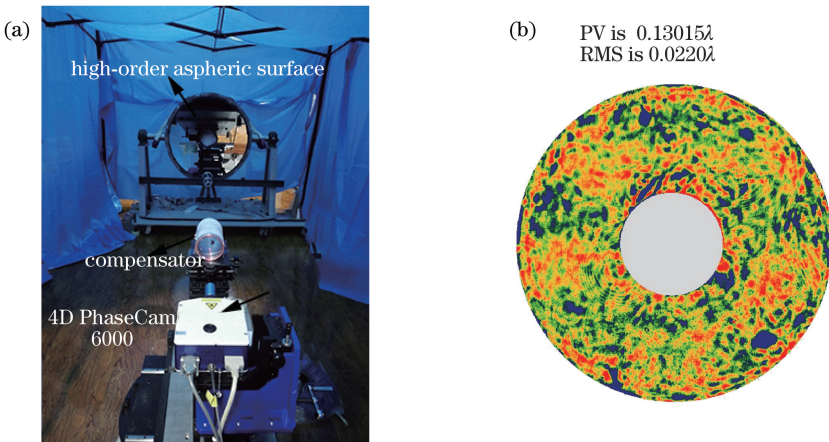


图 5 实际检测图 (a)检测光路;(b)检测结果的干涉图

Fig. 5 Actual test chart. (a) Testing optical path; (b)interferogram of test result

4 结 论

加工大口径高次非球面的过程中,检验方法直

接决定了非球面的加工精度。通过推导高次非球面的球差系数,根据三级像差理论,计算出高次非球面检测的初始结构,然后使用 Zemax 光学软件对初始

结构加以优化,分析了光学系统成像的波前图。对口径为 900 mm 高次凹非球面进行检测,结果完全满足要求,且检测精度较高。

参 考 文 献

- [1] Liu J, Shu X W, Bai J, et al. Reserch on technique of large aperture-digital wavefront test [J]. Optical Instruments, 2003, 25(6): 3-7.
刘军, 舒晓武, 白剑, 等. 大口径数字波面检测技术的研究[J]. 光学仪器, 2003, 25(6): 3-7.
- [2] Liu L, Chen X D, Xiong L, et al. Angle error investigation in laser tracker testing large aspheric mirrors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1104003.
刘力, 陈新东, 熊玲, 等. 大口径非球面镜检测中激光跟踪仪测角误差研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1104003.
- [3] An Q C, Zhang J X, Yang F. Large aperture reflection mirror figure analysis with singular value [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 081204.
安其昌, 张景旭, 杨飞. 奇异值方法在大口径反射镜面形分析中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 081204.
- [4] 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.
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.
- [5] He Y H, Li Q, Gao B, et al. Measurement of the transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens based on computer-generated hologram [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 021202.
何宇航, 李强, 高波, 等. 基于计算全息元件的大口径非球面透镜透射波前检测方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 021202.
- [6] He L, Wu Z H, Kang Y, et al. High order aspheric testing with large asphericity, fast focal ratio and large diameter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 122201.
何丽, 武中华, 康燕, 等. 大非球面度快焦比中大口径高次非球面检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 122201.
- [7] Пуряев Д Т. Optical aspheric surface detection [M]. Yang L, Transl. Beijing: Science Press, 1982: 248-250.
普里亚耶夫. 光学非球面检验 [M]. 杨力, 译. 北京: 科学出版社, 1982: 248-250.
- [8] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 4.
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.
- [9] Hao P M. Design of auxiliary optical system for aspheric surface testing [M]. Beijing: Science Press, 2017: 161-163.
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.
- [10] Hu M Y, Liu W Q, Zhang Q, et al. Testing of paraboloid mirror with super relative aperture using compensator [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(2): 155-158.
胡明勇, 刘文清, 张权, 等. 超大相对孔径抛物面反射镜的补偿检验 [J]. 量子电子学报, 2006, 23(2): 155-158.
- [11] Lin X Y. ZEMAX optical design super learning manual [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 9-13.
林晓阳. ZEMAX 光学设计超级学习手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 9-13.
- [12] Yang X H, Shen W X, Zhang X J, et al. Comparison among different interferometers for measuring power spectral density of optical elements [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904002.
杨相会, 沈卫星, 张雪洁, 等. 不同干涉仪检测光学元件功率谱密度的比较 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904002.