

激光与光电子学进展

大口径半环形高次非球面检测与轻量化分析

崔金龙¹, 胡明勇^{2*}, 毕亚超¹, 封志伟¹, 白茜¹, 陈光宇¹, 徐剑锋¹¹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 为了实现对大口径高次非球面镜的面形精度检测, 本文针对一个内径 572 mm、外径 800 mm 的半环形凹高次非球面反射镜, 进行补偿检测系统设计和轻量化分析。基于三级像差理论, 采用双透镜与单反射面的结构对非球面反射镜进行补偿检测, 得到均方根(RMS)值为 0.0037λ ($\lambda=632.8$ nm) 的补偿检测系统。采用三角形孔对高次非球面镜进行轻量化, 轻量化后镜体质量小于 30 kg, 轻量化率为 32.7%。结合机械支撑结构, 对高次非球面镜与支撑结构在自身重力作用下进行有限元分析。当光轴与重力方向平行时, RMS 值为 0.012λ 。当光轴与重力方向垂直时, RMS 值为 0.013λ , 镜体所受最大应力为 1.308×10^5 Pa, 机械支撑结构所受最大应力为 1.381×10^5 Pa, 非球面镜和支撑结构所受应力都小于各自材料的极限应力。

关键词 光学设计; 高次非球面; 轻量化; 三级像差; 补偿检测; 有限元

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220869

Detection and Lightweight Analysis of Large-Diameter Semi-Annular High-Order Aspheric Surface

Cui Jinlong¹, Hu Mingyong^{2*}, Bi Yachao¹, Feng Zhiwei¹, Bai Qian¹, Chen Guangyu¹,
Xu Jianfeng¹¹School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, Anhui, China;²Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract This study aims to accurately detect the surface shape of large-aperture high-order aspheric mirrors. A compensation detection system is designed, and lightweight analysis of a semi-annular concave high-order aspheric mirror with inner and outer diameters of 572 mm and 800 mm, respectively, is performed. Based on the theory of three-order aberration, the aspheric mirror is compensated for and detected using the double-lens structure and single-reflecting surface, and a compensation detection system with a root-mean-square (RMS) value of 0.0037λ ($\lambda=632.8$ nm) is developed. Triangular holes are used to lighten the high-order aspheric mirror. After achieving light weight, the weight of the lens body becomes less than 30 kg, and the weight reduction rate is 32.7%. A finite element analysis of the high-order aspheric mirror and the support structure under its gravity, combined with the mechanical support structure, is conducted. The RMS values obtained when the optical axis is parallel and perpendicular to the direction of gravity are 0.012λ and 0.013λ , respectively. The maximum stresses on the mirror body and mechanical support structure are 1.308×10^5 Pa and 1.381×10^5 Pa, respectively. The stresses on the aspheric mirror and support structure are lower than the ultimate stress of the respective material.

Key words optical design; high-order aspheric surface; lightweight; third-order aberration; compensation detection; finite element

1 引言

大口径非球面光学元件在光学系统中的使用, 能够校正像差、改善像质, 使光学系统拥有更强集光能力

和更高的成像分辨率, 对光学系统整体性能的提升有很大优势^[1]。大口径非球面镜作为关键的光学元件, 检测难度较大^[2], 随着科学技术的发展, 非球面光学元件的加工和设计问题逐渐得到解决。但大口径高次非

收稿日期: 2022-02-02; 修回日期: 2022-03-04; 录用日期: 2022-03-30; 网络首发日期: 2022-04-09

通信作者: humy8@126.com

球面具有更多的自由度和灵活性,且形状多样等特点^[3],其检测方法仍然是个难点。

对于非球面的检测,国内外从事相关行业的人员进行了大量的研究。1971年,MacGovern等^[4]将计算全息法应用在非球面检测中。2016年,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所何丽等^[5]采用三片式 offner 补偿器实现了对口径 1020 mm 高次项达六次的非球面反射镜的检测。同年,北京空间机电研究所孟晓辉等^[6]采用基于背后反射自准法的零位补偿技术实现了对口径 420 mm 高次项达八次的非球面透镜的检测。2017年,南京理工大学胡文琦等^[7]采用折反零位补偿器实现了对口径 4 m 凹抛物面反射镜的仿真设计。2020年,中国科学院上海技术物理研究所王欣等^[8]采用无限远前后零位补偿检测方法完成了口径为 500 mm 的凹抛物面反射镜检测,以及采用平面波 offner 补偿器完成了口径 720 mm 的二次双曲面的检测^[9]。同年,合肥工业大学光电技术研究院赵础鑫等^[3]采用双透镜补偿器完成了口径 900 mm 高次项达六次的非球面反射镜检测方法的研究。非球面检测中目前最常用的是补偿法^[10]。本文所采用的双透镜与单反射面组合的补偿检测结构能够实现高次项达八次的非球面的面形检测,补偿待检非球面法线像差能力更强。并且由于使用了反射镜,能够有效缩短补偿检测系统的长度,但不能用于待检镜的全口径的检测。

因此本文针对 $\Phi 800$ mm 的大口径半环形高次非球面镜,采用双透镜与单反射面组合的结构对高次非球面进行补偿检测^[11]。对高次非球面的二次比较 e_b^2 值进行计算,利用三级像差理论对补偿检测系统的初始结构进行计算,使用 Zemax 软件对初始结构进行优化,最后得到符合要求的补偿检测系统。并对采用轻量化结构的高次非球面镜结合支撑结构进行有限元分析,验证了使用三角形轻量化孔结构的非球面镜因自重对于面形造成的影响较小。

2 高次非球面参数与补偿检测结构计算

2.1 大口径异形凹高次非球面反射镜的相关参数

面形方程^[12]表示为

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2 y^2}} + A_0 y^2 + A_1 y^4 + A_2 y^6 + A_3 y^8 + \dots, \quad (1)$$

式中: $c = 1/R_0$, R_0 为非球面顶点曲率半径; K 为二次非球面常数; A_0, A_1, A_2, A_3 为高次非球面系数。 $R_0 = 1280.94$, $K = -1.694$, $572 \text{ mm} \leq D \leq 800 \text{ mm}$ 。高次非球面系数如下: $A_0 = 0$, $A_1 = +1.592 \times 10^{-11}$, $A_2 = +1.65 \times 10^{-16}$, $A_3 = -3.612 \times 10^{-22}$ 。面形精度要求 $E_{\text{RMS}} \leq 1/40\lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。高次非球面三维图如图 1 所示。

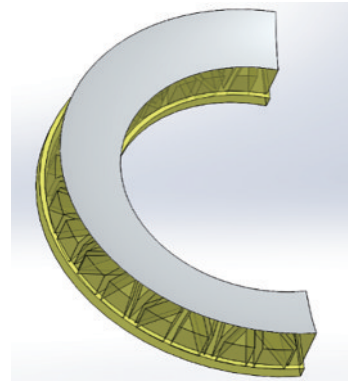


图 1 高次非球面三维图

Fig. 1 Three-dimensional diagram of the aspheric surface in higher order

2.2 高次非球面的比较 e_b^2 值计算

比较 e_b^2 值的求解表达式^[11]为

$$e_b^2 = \frac{y^2 - 2R_0 x + x^2}{x^2}. \quad (2)$$

保持 R_0 不变,高次非球面的最大通光口径 $D = 800 \text{ mm}$, 令 $y = D/2$, 代入高次非球面面形方程式(1)求解 x 值。将 R_0, x, y 代入比较值的求解表达式(2), 求得高次非球面的比较值 e_b^2 。

2.3 补偿检测系统求解

采用双透镜与单反射面组合补偿大口径异形高次非球面产生的法线像差。此检测结构不适用于全口径检测,仅能够检测未闭环的半环形光学元件和光源位于待检镜之前的圆环形光学元件。此检测结构补偿检测光路原理如图 2 所示,光线经过 2 块补偿透镜 1 和 2 在光轴汇聚后到达补偿反射镜 3,经反射镜 3 反射后,沿待检高次非球面 4 的法线方向入射到高次非球面 4,经高次非球面反射后按照原光路返回。

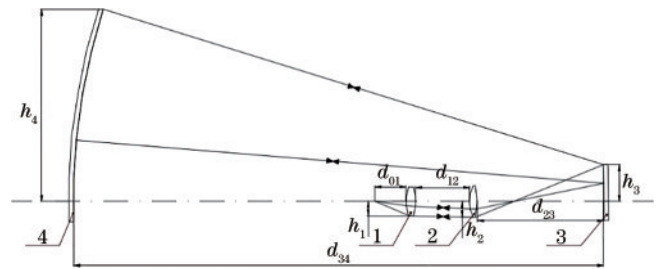


图 2 补偿检测光路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of compensation detection optical path

u_i ($i = 1 \sim 7$, 下同) 分别为光线从发出至原路返回依次入射每个光学镜片的入射角, h_i 为光线依次经过每个光学镜片的入射高度, u'_i 为光线依次经过每个光学镜片的出射角(入射角和出射角在图中未标出)。 $\beta_1 = u_3/u'_3$, $\beta_2 = u_2/u'_2$, $\beta_3 = u_3/u'_3$ 和 $\alpha_1 = h_1/h_4$, $\alpha_2 = h_2/h_4$, $\alpha_3 = h_3/h_4$ 是两个补偿透镜 1 和 2 相对于待检高次非球面 4 的各自放大率和遮拦比。

$\beta = \beta_1\beta_2\beta_3$ 为补偿检测系统的总放大率。由图 2 可知, 光线经过各面的折射率为 $n_1 = 1, n'_1 = n_2 = n, n'_2 = n_3 = 1, n'_3 = n_4 = n, n'_4 = n_5 = -1, n'_5 = n_6 = -1, n'_6 = n_7 = 1, n'_7 = n_8 = -1, n'_8 = n_9 = -n, n'_9 = n_{10} = -1, n'_{10} = n_{11} = -n, n'_{11} = -1$, 其中 n 为补偿透镜 1 和 2 的折射率。

根据三级像差理论, 补偿检测系统的消球差条件为整个系统的球差系数和为 0^[11]。即

$$h_1P_1 + h_2P_2 + h_3P_3 + h_4K + h_5P'_5 + h_6P'_6 + h_7P'_7 = 0, \quad (3)$$

式中: 待检镜的初级球差参量 $K = -(n'_0 - n_0)e^2/r_0^3, n'_0$ 和 n_0 分别为光线经过待检非球面前后的折射率, e 为偏心率, r_0 为待检镜的顶点曲率半径; P_1, P_2, P_3 与 P'_5, P'_6, P'_7 表示光线正向和反向经过透镜 1 和 2 与反射镜 3 时的初级球差参量。

为了便于计算对系统进行如下规划: $h_4 = 1, r_0 = 1, u'_5 = u_4 = u'_4 = u_5 = 1$ 。

对于正反向光路的补偿检测系统, 有 $P_1 = P'_5, P_2 = P'_6, P_3 = P'_7$, 所以式(3)可变化为

$$2h_1P_1 + 2h_2P_2 + 2h_3P_3 + h_4K = 0. \quad (4)$$

根据式(4)结合补偿检测系统光路图化简可得

$$h_1P_1 + h_2P_2 + h_3P_3 - h_4e^2 = 0. \quad (5)$$

(5)式两边同时除以 h_4 可得

$$\frac{h_1}{h_4}P_1 + \frac{h_2}{h_4}P_2 + \frac{h_3}{h_4}P_3 = e^2. \quad (6)$$

$$\text{即} \quad \alpha_1P_1 + \alpha_2P_2 + \alpha_3P_3 = e^2. \quad (7)$$

令 $\alpha_1P_1 = m_1e^2, \alpha_2P_2 = m_2e^2, \alpha_3P_3 = m_3e^2$ (其中 $m_1 + m_2 + m_3 = 1, m_1, m_2$ 和 m_3 为透镜 1 和 2 与反射镜 3 对待检镜的法线像差的分担比例), 求得 P_1, P_2 和 P_3 , 分别表示为

$$\begin{cases} P_1 = \frac{m_1e^2}{\alpha_1} \\ P_2 = \frac{m_2e^2}{\alpha_2} \\ P_3 = \frac{m_3e^2}{\alpha_3} \end{cases} \quad (8)$$

反射镜 3 的初级球差参量 P_3 表示为

$$P_3 = \left[\frac{n'_5n_5(u'_3 - u_3)}{n'_5 - n_5} \right]^2 \left(\frac{u'_3}{n'_5} - \frac{u_3}{n_5} \right) = -\frac{1}{4}(1 - \beta_3)^2(1 + \beta_3). \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)中的 P_3 可得

$$\alpha_3(1 - \beta_3)^2(1 + \beta_3) + 4m_3e^2 = 0. \quad (10)$$

根据(10)式, 选取合适的 m_3 与 α_3 , 求解得到 β_3 。

对补偿反射镜 3 利用近轴公式计算可得

$$\frac{n'_5 - n_5}{r_5} = \frac{n'_5}{l'_3} - \frac{n_5}{l_3}, \quad (11)$$

式中: r_5 为反射镜 3 的曲率半径; l_3 和 l'_3 在近轴光线条件下球面反射的物截距和像截距。

式(11)两边同时乘以 h_3 可得

$$\frac{2h_3}{r_5} = u'_3(1 + \beta_3). \quad (12)$$

从补偿反射镜 3 出射的光线沿待检高次非球面法线方向入射高次非球面 4, 所以有 $u'_3 = h_4/r_0$, 将其代入式(12)可得

$$r_5 = \frac{2\alpha_3r_0}{1 + \beta_3}. \quad (13)$$

光线经过对应透镜和反射镜的光线偏角 $h_1\varphi_1, h_2\varphi_2, h_3\varphi_3$ 以及补偿检测系统的总偏角 $h\varphi(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 为对应补偿光学元件的光焦度), 可得

$$\begin{cases} h_1\varphi_1 = u'_1 - u_1 = u'_1(1 - \beta_1) = \beta_3\beta_2(1 - \beta_1) \\ h_2\varphi_2 = u'_2 - u_2 = u'_2(1 - \beta_2) = \beta_3(1 - \beta_2) \\ h_3\varphi_3 = u'_3 - u_3 = u'_3(1 - \beta_3) = 1 - \beta_3 \\ h\varphi = h_1\varphi_1 + h_2\varphi_2 + h_3\varphi_3 = u'_3 - u = 1 - \beta \end{cases} \quad (14)$$

当补偿透镜 1 和 2 的材料折射率为 n 时, 物体处于无穷远处时补偿透镜规划条件下的最小值 P_0^∞ 表示为

$$P_0^\infty = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right]. \quad (15)$$

补偿透镜 1 和 2 的初级球差参量规划值 P'_1 和 P'_2 表示为

$$\begin{cases} P'_1 = \frac{P_1}{(h_1\varphi_1)^3} = \frac{m_1e^2}{\alpha_1(u'_1 - u_1)^3} \\ P'_2 = \frac{P_2}{(h_2\varphi_2)^3} = \frac{m_2e^2}{\alpha_2(u'_2 - u_2)^3} \end{cases} \quad (16)$$

u_{11} 和 u_{21} 为补偿透镜 1 和 2 光线入射角 u_1 和 u_2 的规划孔径角, 即

$$\begin{cases} u_{11} = \frac{u_1}{h_1\varphi_1} = \frac{u_1}{u'_1 - u_1} = \frac{\beta}{\beta_3\beta_2(1 - \beta_1)} \\ u_{21} = \frac{u_2}{h_2\varphi_2} = \frac{u_2}{\beta_3(1 - \beta_2)} \end{cases} \quad (17)$$

其弯曲 Q_1 和 Q_2 与规划值 P'_1 和 P'_2 之间的关系为

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{2n+2}{n+2}u_{11} - \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \pm \sqrt{\left[P'_1 - P_0^\infty + \frac{n}{n+2}(u_{11} + u_{11}^2) \right] \frac{n}{n+2}} \\ Q_2 = \frac{2n+2}{n+2}u_{21} - \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \pm \sqrt{\left[P'_2 - P_0^\infty + \frac{n}{n+2}(u_{21} + u_{21}^2) \right] \frac{n}{n+2}} \end{cases} \quad (18)$$

然后将 Q_1, Q_2 代入式 (19) 求出补偿透镜 1 和 2 的曲率半径分别为 r_1, r_2 和 r_3, r_4 。

$$\begin{cases} r_1 = \frac{1}{\left(Q_1 + \frac{n}{n-1}\right) \cdot \varphi_1} \\ r_2 = \frac{1}{(Q_1 + 1) \cdot \varphi_1} \\ r_3 = \frac{1}{\left(Q_2 + \frac{n}{n-1}\right) \cdot \varphi_2} \\ r_4 = \frac{1}{(Q_2 + 1) \cdot \varphi_2} \end{cases} \quad (19)$$

不考虑透镜的厚度, 求解干涉仪与透镜 1 之间的距离 d_{01} , 透镜 1 与透镜 2 之间的距离 d_{12} , 透镜 2 与反射镜 3 之间的距离 d_{23} , 反射镜 3 与待检高次非球面 4 之间的距离 d_{34} 。

$$\begin{cases} d_{01} = -\frac{h_1}{u} = -\frac{h_1}{\beta} \\ d_{12} = \frac{h_1 - h_2}{u'_1} \\ d_{23} = \frac{h_2 - h_3}{u'_2} \\ d_{34} = h_3 - h_4 \end{cases} \quad (20)$$

3 设计结果及分析

3.1 设计结果

设定 $\alpha_1 = -0.1, \alpha_2 = -0.1, \alpha_3 = 0.1, \beta = 0.45, m_1 = 0.5, m_2 = 0.2, m_3 = 0.3$ 。根据消球差条件计算出补偿检测系统的初始结构。然后利用 Zemax 软件, 选择待检非球面的表面类型为偶次非球面, 对计算出的初始结构进行放缩加厚优化, 直到优化出满足设计要求的补偿检测系统。优化后满足设计要求的补偿检测系统结构参数如表 1 所示。

表 1 补偿检测系统结构参数
Table 1 Compensate test system structure parameters

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter /mm	Conic
OBJ	Infinity	222.242	Air	0	0
1	98.109	20.000	H-K9L	55	0
2	-570.275	134.353	Air	55	0
3	66.021	20.000	H-K9L	45	0
4	276.057	206.033	Air	45	0
5	-1200.000	-1217.880	Mirror	45	0
STO	1280.940	1217.880	Mirror	400	See parameters
7	-1200.000	-206.033	Mirror	45	0
8	276.057	-20.000	H-K9L	45	0
9	66.021	-134.353	Air	45	0
10	570.275	-20.000	H-K9L	55	0
11	98.109	-222.242	Air	55	0
IMA	Infinity	-	Air	7.285E-003	0

设计出的补偿检测系统光路图如图 3 所示。补偿检测系统的波前图如图 4 所示, 补偿检测系统

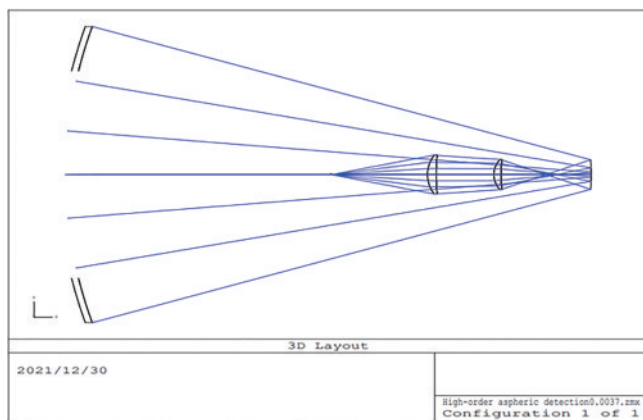


图 3 补偿检测系统光路图

Fig. 3 Optical path diagram of compensation detection system

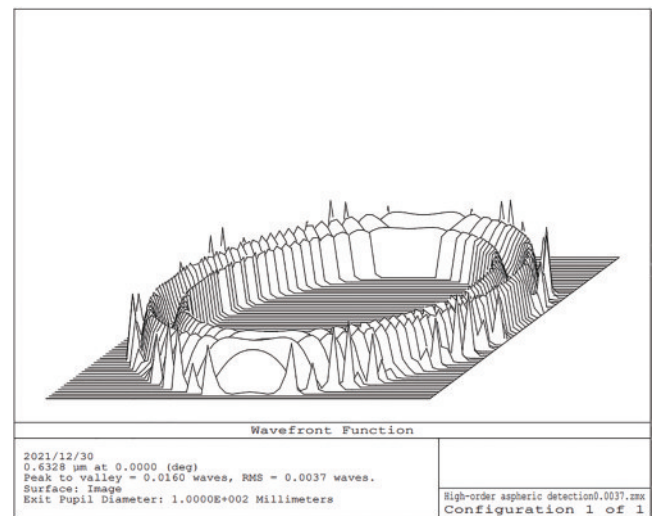


图 4 波前图

Fig. 4 Wavefront diagram

的峰谷 (P-V) 值为 0.0160λ , 均方根 (RMS) 值为 0.0037λ 。点列图如图 5 所示, 弥散斑半径为 $0.065\ \mu\text{m}$ 。设计结果满足补偿检测要求。

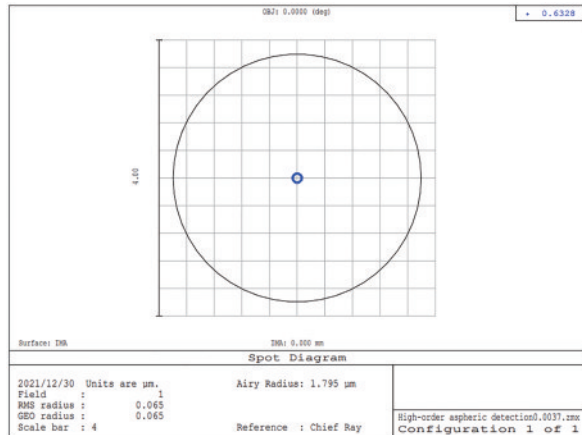


图 5 点列图
Fig. 5 Spot diagram

3.2 公差分析

对补偿系统进行公差分析, 考虑到光线在补偿反射镜 3 上发生两次反射, 将反射镜的面形误差放大两倍。光学元件公差参数如表 2 所示。

在检测过程中, 光学元件的中心间隔误差小于 $\pm 0.02\ \text{mm}$, 偏心距离小于 $\pm 0.02\ \text{mm}$, 倾斜角度小于 $\pm 0.01^\circ$, 各项公差值在现有条件下均可检验^[13]。使用 Zemax 软件进行 5000 次蒙特卡罗分析, 90% 分析结果的波前均方根优于 0.0142λ , 可知该补偿检测系统对于待检高次非球面的面形检测精度较高, 满足实际检测要求 $1/40\lambda$ 。

4 高次非球面镜轻量化分析

4.1 非球面镜材料与轻量化形式的确定

可用作反射镜的常用材料有熔石英、微晶玻璃、超低膨胀玻璃、铝、硅、铍和碳化硅等^[14]。针对该高次非球面镜要求具有良好的热稳定性、抗变形能力和较轻的质量, 结合常用材料的属性参数以及现有的玻璃材料, 选择微晶玻璃作为该高次非球面镜的材料。主镜轻量化孔的形式主要有三角形、扇形(四边形)、六边形、圆形以及异形孔等形式^[15]。结合目前国内轻量化研究的基础, 三角形孔的综合条件较为合理, 且具有较好的各向同性^[16]。因此, 选择三角形轻量化孔。结合该高次非球面镜的形状特点, 使用两个三角形斜边平行组合的形式。三角形轻量化具体参数如图 6 所示。

表 2 表面公差参数

Table 2 Surface tolerance parameters

Compensator	Refractive index	Decenter /mm	Tilt /($^\circ$)	Thickness /mm	Radius /mm	Surface irregularity / λ
Compensator 1	0.0005	± 0.01	± 0.001	± 0.02	± 0.1	0.1
Compensator 2	0.0005	± 0.01	± 0.001	± 0.02	± 0.1	0.1
Compensator 3	-	-	± 0.001	-	± 0.1	0.2

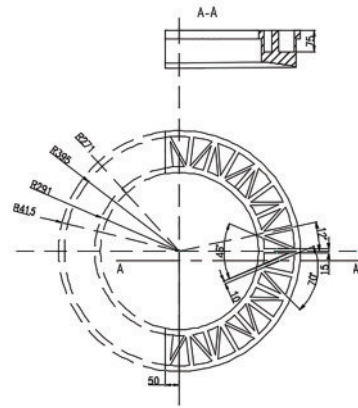


图 6 三角形轻量化具体参数

Fig. 6 Specific parameters of triangular lightweight

4.2 支撑方式

支撑方式按与主镜接触点的位置分为周边支撑、中心支撑和背部支撑等^[17]。结合该高次非球面镜的形状特点选择周边支撑, 其支撑结构三维图如图 7 所示。该支撑结构不仅有利于面形检测的装夹, 还是后期使用时对于非球面镜的机械固定安装结构。考虑到该支撑结构的刚度、热稳定性和重量。选择钛合金作为该支撑结构的材料。

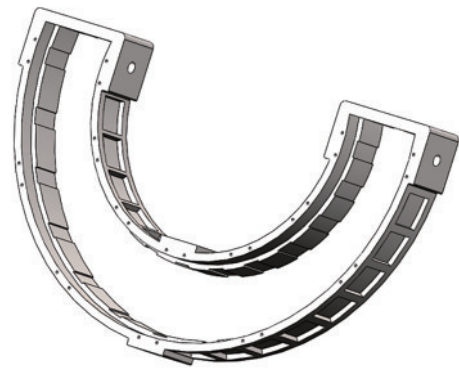


图 7 支撑结构三维图

Fig. 7 Three-dimensional diagram of support structure

4.3 静力学分析

对于该高次非球面镜的静力学分析, 主要考虑非球面镜和支撑结构在自身重力的作用下, 光轴与重力方向平行和光轴与重力方向垂直时对镜面变形进行分析。利用有限元分析软件 ANSYS Workbench 18.0 对非球面镜和支撑结构进行分析计算, 建立未轻量化和轻量化非球面镜模型。

经有限元分析计算后,未轻量化之前的非球面镜总质量为 43.616 kg。轻量化之后的总质量为 29.351 kg。轻量化率计算公式为

$$\eta = \frac{M_s - M_l}{M_s} \times 100\%, \quad (21)$$

式中: M_s 为未轻量化质量; M_l 为轻量化后质量。计算可得轻量化率为 32.7%。

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}, \quad (22)$$

式中: n 为采样点变形结果个数; x_i 为变形量。

将非球面镜水平放置,轻量化前后镜面在自身重力作用下沿光轴方向(Z 轴)的变形云图如图 8 所示(未加支撑结构)。可以看出,未轻量化之前镜面变形量最大值为 -1.008 nm ,最小值为 -2.045 nm 。轻量化之后变形量最大值为 -0.972 nm ,最小值为 -3.158 nm 。将变形结果数据导出,按照式(22)计算可得,轻量化前后 RMS 分别为 $1.698 \times 10^{-9} \text{ m}$ 和 $2.655 \times 10^{-9} \text{ m}$,即 0.0027λ 和 0.0042λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)。可见轻量化后对于镜面要求的影响远低于 $1/40\lambda$ 。轻量化后非球面镜所受最大应力为 4582.9 Pa ,位于轻量化孔的筋板处,远小于微晶玻璃的极限应力,如图 9 所示。

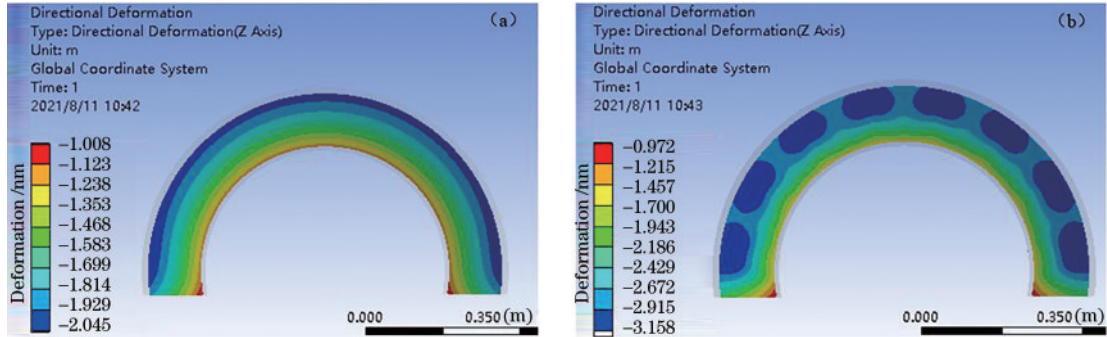


图 8 变形云图。(a)轻量化前变形云图;(b)轻量化后变形云图

Fig. 8 Deformation cloud maps. (a) Deformation cloud map before lightweight; (b) deformation cloud map after lightweight

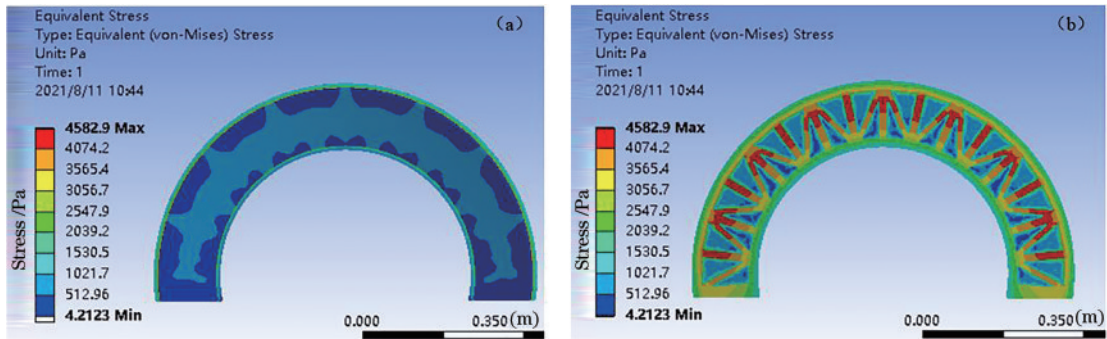


图 9 非球面镜所受应力云图。(a)正面应力云图;(b)背面应力云图

Fig. 9 Stress cloud maps of the aspherical mirror. (a) Frontal stress cloud map; (b) rear stress cloud map

考虑到后期使用时支撑结构对于非球面镜的安装固定,但支撑结构与非球面镜的配合安装以及固定方式也会影响镜面的面形。为此需要对支撑结构和非球面镜进行组合,真实模拟后期使用时非球面镜的安装环境,并进行有限元分析,支撑结构和非球面镜的装配结构三维图如图 10 所示。

当光轴与重力方向平行时,使用强迫位移约束,设置非球面镜的背面的 7 个固定板在 Z 轴(光轴方向)方向受限, X 和 Y 方向自由。当光轴与重力方向垂直时,对支撑结构的 6 个安装固定的位置设置约束位置为固定约束。镜面沿光轴方向的变形云图分别如图 11(a)和(b)所示,当光轴与重力方向平行时,变形量最大值为 -3.093 nm ,最小值为 -12.086 nm 。当光轴与重力方向垂直时,变形量最大值为 14.393 nm ,

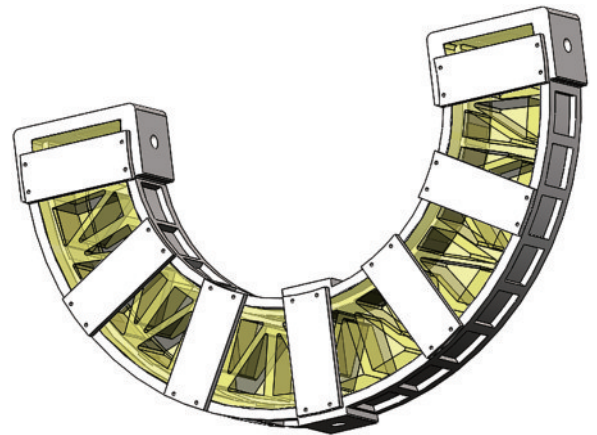


图 10 装配结构三维图

Fig. 10 Three-dimensional diagram of assembly structure

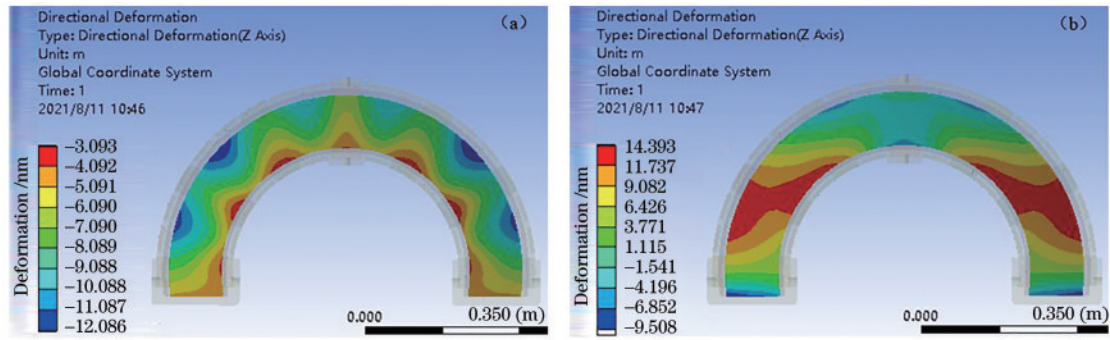


图 11 镜面沿光轴方向的变形云图。(a)光轴与重力方向平行;(b)光轴与重力方向垂直

Fig. 11 Deformation cloud maps of the mirror along the optical axis. (a) Optical axis is parallel to the direction of gravity; (b) optical axis is perpendicular to the direction of gravity

最小值为 -9.508 nm 。将变形结果数据导出,按照式(22)计算可得,RMS分别为 $7.589 \times 10^{-9} \text{ m}$ 和 $8.002 \times 10^{-9} \text{ m}$,即 0.012λ 和 0.013λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$),满足要求。

光轴与重力方向垂直是后期安装使用时的真实环

境,因此对非球面镜和支撑结构进行应力分析,图12(a)和(b)为非球面镜和支撑结构应力云图。非球面镜所受到的最大应力为 $1.308 \times 10^5 \text{ Pa}$,远小于微晶玻璃的极限应力。支撑结构所受最大应力为 $1.381 \times 10^5 \text{ Pa}$,远小于钛合金的极限应力。

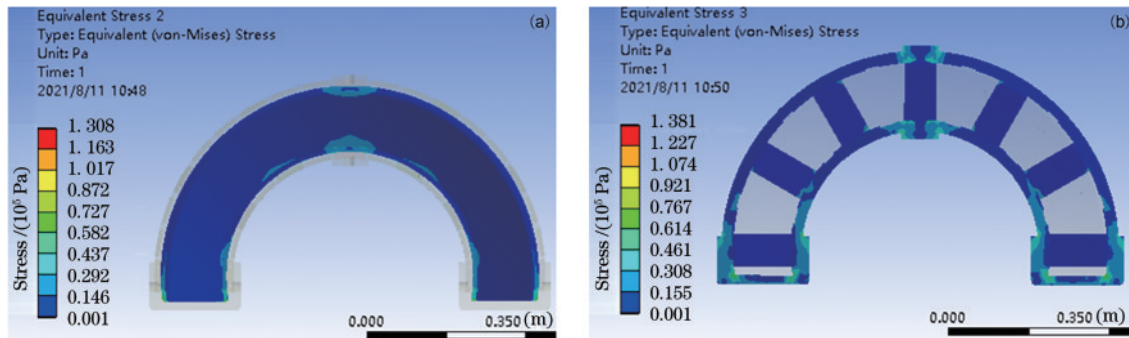


图 12 应力云图。(a)非球面镜应力云图;(b)支撑结构应力云图

Fig. 12 Stress cloud maps. (a) Stress cloud map of aspherical mirror; (b) stress cloud map of supporting structure

5 结 论

本文针对 $\Phi 800 \text{ mm}$ 大口径半环形高次非球面的加工检测需要,采用双透镜与单反射镜相结合的结构形式,得到设计精度为 0.0037λ 的补偿检测系统。并对补偿检测系统进行公差分析,验证该补偿检测系统的可用性。在光轴与重力方向平行和光轴与重力方向垂直时,对高次非球面镜和支撑结构受自身重力影响进行了静力学分析,分析结果表明,对面形的影响 RMS 值分别为 0.012λ 和 0.013λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$),非球面镜和支撑结构所受应力也都小于各自材料的极限应力,满足设计要求。本文所使用的检测方法和轻量化结构形式对该种大口径半环形高次非球面镜检测和轻量化设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

[1] 刘锋伟, 吴永前, 陈强, 等. 大口径光学非球面镜先进制造技术概述[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200203.
Liu F W, Wu Y Q, Chen Q, et al. Overview of advanced manufacturing technology of large-aperture

aspheric mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(10): 200203.

- [2] 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.
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.
- [3] 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.
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.
- [4] MacGovern A J, Wyant J C. Computer generated holograms for testing optical elements[J]. Applied Optics, 1971, 10(3): 619-624.
- [5] 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.
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.
- [6] 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.
- [7] 胡文琦, 叶璐, 何勇, 等. $\Phi 4$ m 口径凹抛物面镜折反零位补偿检验[J]. *量子电子学报*, 2017, 34(4): 394-399.
- Hu W Q, Ye L, He Y, et al. Catadioptric null compensation test of a concave paraboloidal mirror with 4 m aperture[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(4): 394-399.
- [8] 王欣, 刘强, 周浩, 等. 无限远前后零位补偿结合的非球面检验[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1722003.
- Wang X, Liu Q, Zhou H, et al. Aspheric test combining front and back null compensation for infinite optical path [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1722003.
- [9] 周浩, 王欣, 刘强, 等. 基于平面波 Offner 补偿器检验非球面的光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190801.
- Zhou H, Wang X, Liu Q, et al. Optical system design of offner compensator with infinity object distance applied on aspheric mirror testing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190801.
- [10] 范俊玲. 大口径非球面检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 3-9.
- Fan J L. The research on the testing methods of large aperture aspheric mirror[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 3-9.
- [11] 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.
- Hao P M. Design of auxiliary optical system for aspheric surface inspection[M]. Beijing: Science Press, 2017: 161-163.
- [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: 4-5.
- Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 4-5.
- [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.
- [14] 李志来, 徐宏, 关英俊. 1.5 m 口径空间相机主镜组件的结构设计[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1635-1641.
- Li Z L, Xu H, Guan Y J. Structural design of 1.5 m mirror subassembly for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1635-1641.
- [15] 王富国, 杨洪波, 赵文兴, 等. 1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 85-91.
- Wang F G, Yang H B, Zhao W X, et al. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 85-91.
- [16] 郭喜庆, 王悦勇. 大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(6): 518-521.
- Guo X Q, Wang Y Y. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy caliber mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6): 518-521.
- [17] 俞天野, 贾建军. 大口径主反射镜的轻量化方案设计[J]. *红外*, 2007, 28(8): 6-10.
- Yu T Y, Jia J J. Light weight design of large-diameter mirror[J]. *Infrared*, 2007, 28(8): 6-10.