

基于自由曲面透镜阵列的共形整流罩动态像差校正

句源¹, 赵春竹^{2**}, 朴明旭^{1*}, 郭玉¹, 顾姗姗¹, 郑汉青¹¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;² 北京大学分子医学研究所, 北京 100871

摘要 为了校正大长径比、大扫描视角共形整流罩引入的动态像差, 提出了一种固定自由曲面透镜阵列校正器。通过设计透镜阵列校正器中各透镜自由曲面的面形和旋转角度, 校正不同扫描视角大长径比共形整流罩引入的动态像差。实验结果表明, 自由曲面透镜阵列校正器可以对长径比为 1.2 的共形整流罩实现 $\pm 50^\circ$ 扫描视角的动态像差校正。这种新型校正器具有动态校正器和固定校正器的优点, 可适用于扫描视角大、长径比大以及稳定性高的共形整流罩光学系统。

关键词 光学设计; 共形光学; 整流罩; 自由曲面透镜; 透镜阵列

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0922002

Dynamic Aberration Correction for Conformal Dome Based on Free-Form Lens Array

Ju Yuan¹, Zhao Chunzhu^{2**}, Piao Mingxu^{1*}, Guo Yu¹, Gu Shanshan¹, Zheng Hanqing¹

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Institute of Molecular Medicine, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract A fixed free-form lens array corrector is proposed in this paper to correct the dynamic aberration introduced by a conformal dome with large length-diameter ratio and large scanning angle. By designing the free-form surface shape and rotation angle of each lens of the lens array corrector, the dynamic aberration introduced by the large length-diameter ratio conformal fairing in different scanning angles is corrected. The experimental results show that the free-form lens array corrector can realize $\pm 50^\circ$ scanning angle dynamic aberration correction for a conformal dome with a length-diameter ratio of 1.2. The new corrector has the advantages of both a dynamic corrector and a fixed corrector, and is suitable for a conformal dome optical system with a large scanning angle, a large length-diameter ratio and high stability.

Key words optical design; conformal optics; dome; free-form lens; lens array

OCIS codes 220.3620; 220.1000; 220.1250

1 引言

传统导引头整流罩是一个同心的球面罩, 其像差易校正, 但会给导引头带来很大的气动阻力, 难以满足现代导引头的发展需求^[1-4]。相比传统整流罩,

共形光学整流罩与飞行器的气动外形更匹配, 能提升导引头的空气动力学性能, 长径比为 1.2 的椭球形共形整流罩受到的阻力仅为球形整流罩的 $2/3$ ^[5-6]。但共形光学整流罩通常会引入大量的动态像差^[7-9], 且动态像差会随观察角度(LA)的变化而变

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-11-20; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61805026)、吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20190580KJ)、长春理工大学青年自然科学基金(XQNJJ-2017-09)

* E-mail: piaomingxu123@126.com; ** E-mail: czzhao@pku.edu.cn

化。目前,对椭球形整流罩的像差校正方法可分为动态校正和静态校正两大类。动态校正^[10]是在成像系统中加入一个或多个可变的光学元件,通过电控旋转和平移光学元件实现动态像差的校正。该方法可校正共形整流罩大视角的动态像差,但系统的结构复杂、稳定性差。静态校正^[11-13]是在整流罩后加入固定校正板以校正整流罩引入的像差,如自由曲面校正器、偶次非球面校正器、拱形校正器。这种方法设计的系统结构相对简单、稳定性好,但只能在小视角范围内校正动态像差,无法应用于大扫描视角共形整流罩的动态像差校正。

针对上述问题,本文提出了一种固定的二维自由曲面透镜阵列校正器,以校正椭球形共形整流罩的动态像差。首先,通过优化整流罩的内表面平衡整个扫描视角的动态像差;然后,设计了一个固定的二维自由曲面透镜阵列校正器,并将其固定在像面前,每个 LA 的像差由透镜阵列中对应的透镜单元进行校正,最终实现共形光学整流罩的动态像差校正。实验结果表明,在 $\pm 50^\circ$ 的扫描视角内,该方法可校正长径比为 1.2 的椭球形共形整流罩引入的动态像差。

2 设计原理

图 1 为基于自由曲面透镜阵列的椭球形共形整流罩像差校正原理图。由于共形整流罩面形复杂且光束通过共形整流罩的有效面积随 LA 的变化而变化,因此,共形整流罩引入的像差随 LA 的变化呈动态变化。在整流罩后放置扫描成像系统,可将每个 LA 看成一个单独的成像通道。当扫描成像系统转

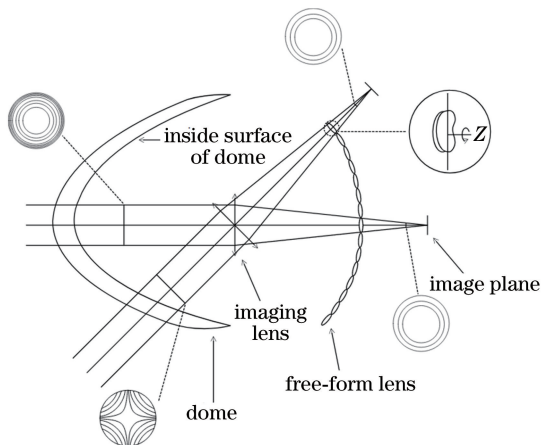


图 1 基于自由曲面透镜阵列的共形整流罩像差校正原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the conformal dome aberration correction based on free-form lens array

动到某一角度时,该通道光束在共形整流罩外表面引入的波前误差可表示为 $W_{\text{confor-LA}}(x, y)$, 其中, (x, y) 为全局坐标, 光束继续通过共形整流罩内表面时引入的波前误差可表示为 $\Delta W_{\text{confor-LA}}(x, y)$ 。在各成像通道的光束非重叠区域插入一个透镜阵列, 透镜阵列中每个透镜单元对应一个成像通道。透镜单元引入的波前误差可表示为 $W_{\text{Lensunit-LA}}[(x, y), \nu]$, 其中, ν 为透镜单元绕局部 Z 轴旋转的角度, 可作为一个自由度校正整流罩引入的动态旋转像差。因此, 某个成像通道的波前误差可表示为

$$W_{\text{LA}} = W_{\text{confor-LA}}(x, y) + \Delta W_{\text{inner-LA}}(x, y) + W_{\text{Lensunit-LA}}[(x, y), \nu]. \quad (1)$$

可以发现, 每个透镜单元可校正对应通道共形整流罩引入的像差, 最终在整个扫描视角范围内, 通过各成像通道排列组成的透镜阵列校正共形整流罩引入的动态像差。

3 设计实例

3.1 共形光学系统的初始结构

共形光学系统的初始结构由一个共形整流罩和一个扫描透镜组成, 如图 2 所示。共形整流罩为椭球面形, 可表示为

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c(x^2 + y^2)}}, \quad (2)$$

式中, z 为椭球表面的矢高, k 为二次曲线系数, c 为顶点曲率。为了满足空气动力学性能, 共形整流罩椭球面形的长径比为 1.2^[6], 综合考虑了常用红外整流罩材料的制备与加工特性, 用氟化镁材料制备整流罩^[14]。实验采用 NEC 公司生产的 HX3100 型非制冷红外探测器, 其像元尺寸为 $23.5 \mu\text{m} \times 23.5 \mu\text{m}$, 光敏面尺寸为 $15.4 \text{mm} \times 11.28 \text{mm}$ 。其中, 共形光学系统的总长为 150 mm, 扫描透镜的焦距为 80 mm, 透镜材料为硫化锌, F 数为 2.75, 瞬时视场为 $3^\circ \times 4^\circ (X \times Y)$, 设计的红外波长为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。在 $Y-Z$ 平面上, 扫描透镜在共形整流罩后旋转, 可达到 $\pm 50^\circ$ 的大扫描视角。此外, 椭球形整流罩为旋转轴对称结构, 即 $0^\circ \sim 50^\circ$ 引入的动态像差与 $-50^\circ \sim 0^\circ$ 引入的动态像差相同, 因此, 设计中只需考虑 $0^\circ \sim 50^\circ$ 扫描范围内的像差。

将初始共形光学系统出瞳处的波前用 Zernike 多项式进行拟合^[15-16], 通过分析 Zernike 各项系数的变化情况, 分析共形光学系统的像差。Zernike 多项式可表示为

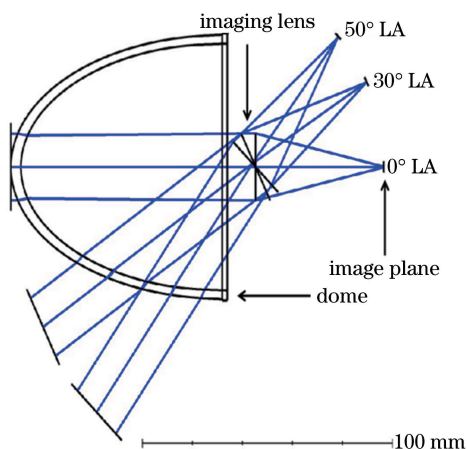


图 2 共形光学系统 LA 叠加的初始结构
Fig. 2 Initial structure of the LA superposition of the conformal optical system

$$W(\rho, \theta) = \sum_j^{18} Z_j U_j(\rho, \theta), \quad (3)$$

式中, (ρ, θ) 为极坐标, $W(\rho, \theta)$ 为系统出瞳处的波前误差, j 为 Zernike 多项式的阶数, Z_j 为 Zernike 多项式的系数, $U_j(\rho, \theta)$ 为 Zernike 项。图 3 为不同 LA 时 Zernike 系数的变化情况。其中, Z_1 为常数, Z_2 和 Z_3 为不影响图像质量的常数, 分别表示弧矢倾斜和子午倾斜, Z_4 为离焦, 只影响像面的最佳位置, 不是真正的像差, Z_5 和 Z_8 分别为子午像散与弧矢彗差, Z_6 为弧矢像散, Z_7 为子午彗差, Z_9 为球差, $Z_{10} \sim Z_{18}$ 为高级像差, 均小于 0.2。可以发现, Z_3 、 Z_4 、 Z_5 和 Z_8 的值随着 LA 的增加有明显变化, 表明这些参数是共形整流罩引入的主要像差。

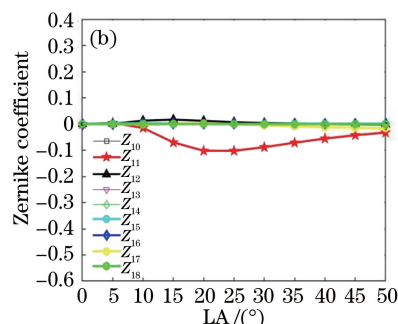
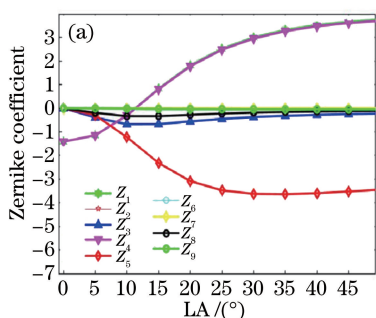


图 3 初始共形光学系统 Zernike 系数与 LA 的关系。(a) $Z_1 \sim Z_9$; (b) $Z_{10} \sim Z_{18}$

Fig. 3 Relationship between the Zernike coefficient of the initial conformal optical system and LA.

(a) $Z_1 \sim Z_9$; (b) $Z_{10} \sim Z_{18}$

3.2 整流罩内表面的设计

整流罩内表面的设计^[17-18]采用偶次非球面并随理想扫描透镜旋转角度依次进行优化, 非球面的最高次项为 8, 以平衡共形整流罩产生的动态像差。

图 4 为校正后整流罩内表面剩余像差的 Zernike 系数变化情况, 可以发现, 子午像散 Z_5 在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 上升, $20^\circ \sim 50^\circ$ 下降, 从而平衡了整个视场的像差。

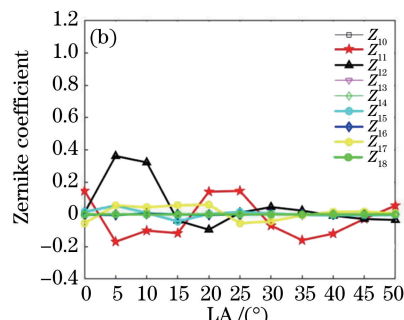
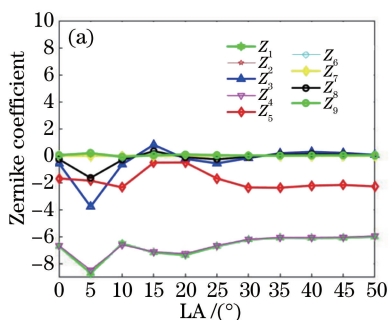


图 4 校正后整流罩内表面 Zernike 系数与 LA 的关系。(a) $Z_1 \sim Z_9$; (b) $Z_{10} \sim Z_{18}$

Fig. 4 Relationship between Zernike coefficient and LA on the inner surface of the dome after correction.

(a) $Z_1 \sim Z_9$; (b) $Z_{10} \sim Z_{18}$

3.3 球面透镜阵列的设计

由于 LA 不同时整流罩非对称, 常规旋转对称

面形静态校正器不能很好地校正静态和动态像差, 但对于每个 LA, 整流罩引入的像差是静态的。因

此,将每个 LA 视为一个单独的成像通道,将共形整流罩引入的动态像差转化为每个成像通道的静态像差。实验中用固定透镜阵列校正共形整流罩的动态像差,共形光学系统的结构如图 5 所示。为确保各成像通道之间互不干扰,需将透镜阵列放入各扫描成像通道光路的未交叠区域,如图 5(b)所示。其中,点 K 后的相邻成像通道之间没有重叠,在点 K

后放入透镜阵列可避免每个通道的图像重叠。最后利用透镜阵列中各透镜形成的单元通道分别校正不同 LA 成像通道共形整流罩引入的动态像差。透镜阵列采用标准面形,并用 ZEMAX 软件^[17]分别优化各 LA 透镜表面的曲率参数,透镜阵列前后表面的曲率如图 6 所示,其中,扫描透镜的瞬时视场为 $3^\circ \times 4^\circ (X \times Y)$ 。为了保证扫描视角的连续性,LA 的间

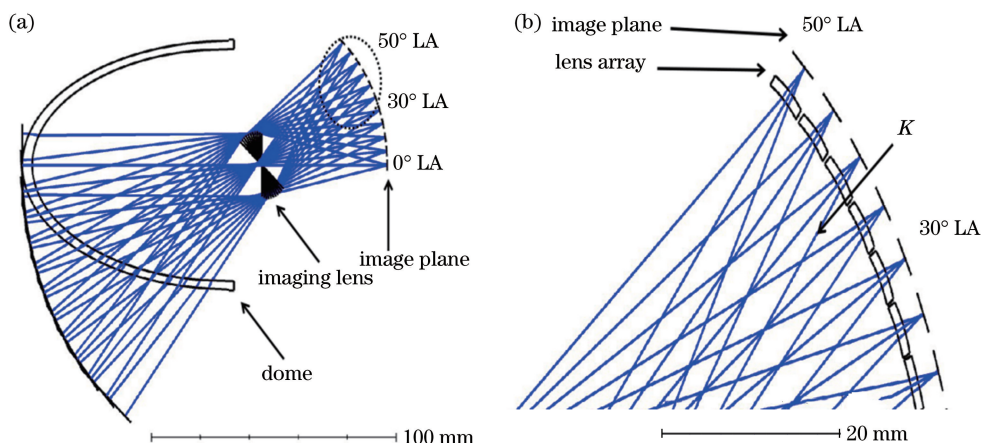


图 5 共形光学系统的结构。(a) Y-Z 平面内 LA 为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 时的透镜阵列;(b) 相邻透镜阵列成像通道的光路
Fig. 5 Structure of the conformal optical system. (a) Lens array when the LA is $0^\circ \sim 50^\circ$ in the Y-Z plane;
(b) optical path of the imaging channel of the adjacent lens array

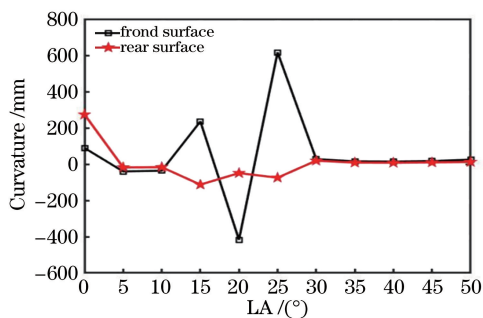


图 6 优化后不同 LA 透镜阵列表面的曲率
Fig. 6 Curvatures of the surfaces of different LA lens arrays after optimization

隔为 5° ,且每个透镜单元对应一个成像通道。图 7 为添加透镜阵列和优化整流罩内表面的共形光学系统在不同 LA 时的 Zernike 系数变化情况。可以发现,子午像散 Z_5 在 LA 为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 时,由 -1.4 左右减小到 -0.5 ;在 LA 为 $10^\circ \sim 45^\circ$ 时,由 -4 减小到 ± 0.5 ;在 LA 为 $45^\circ \sim 50^\circ$ 时,由 -4 左右减小到 -1 。虽然通过标准面透镜阵列可减小整个扫描视角产生的动态像差,但还不足以校正整流罩产生的像差,因此还需进一步优化。此外,共形整流罩和透镜阵列的光焦距极小,不会给共形整流罩系统引入色差。

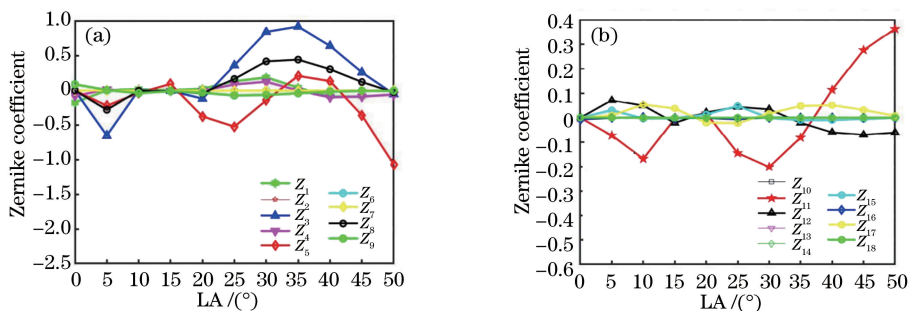


图 7 加入透镜阵列后共形光学系统 Zernike 系数与 LA 的关系。(a) $Z_1 \sim Z_9$;(b) $Z_{10} \sim Z_{18}$
Fig. 7 Relationship between the Zernike coefficient and LA of the conformal optical system after adding lens array.
(a) $Z_1 \sim Z_9$; (b) $Z_{10} \sim Z_{18}$

3.4 自由曲面透镜阵列的设计

为了使透镜阵列更好地校正共形整流罩引入的动态像差,将透镜单元标准面面形改为自由曲面面形。通过 ZEMAX 软件和条纹 Zernike 多项式面形描述自由曲面,条纹 Zernike 多项式面形可表示为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^{18} C_j Z_j, \quad (4)$$

式中, Z 为表面突出部分的矢高, r 为弧线的径向半径。每个条纹 Zernike 多项式均可用归一化极坐标 (ρ, θ) 表示,其中, $\rho = r/R_{\text{norm}}$, R_{norm} 为归一化半径。在前 9 个条纹 Zernike 多项式中, Z_4 和 Z_9 项引入的矢高是非旋转对称的。条纹 Zernike 多项式面形具有较多的像差校正自由度,引入的非对称矢高能很好地校正非对称像差,因此,将透镜阵列中透镜单元对应的球面改为 Zernike 多项式

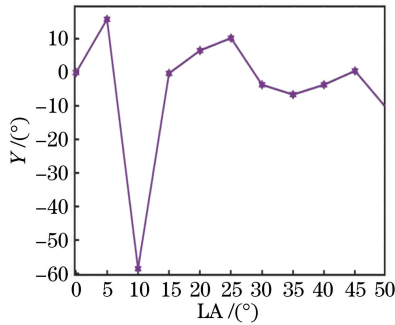


图 8 每个透镜单元围绕 Z 轴旋转的扫描角度
Fig. 8 Scanning angle of rotation of each lens element around the Z axis

表面。

为了分析透镜阵列校正后剩余像差对应的 Zernike 项系数,将球面曲率作为优化起点,逐步增加条纹 Zernike 项级次。如在优化过程中,直接引入子午像散 Z_5 和弧矢彗差 Z_8 对应的低次条纹 Zernike 项进行优化校正,然后逐步增加更高次条纹 Zernike 项进行优化,从而实现主要像差的校正和各透镜单元像差的单独优化。此外,考虑到某些 Zernike 项会改变表面的位置,即共形整流罩在 $Y-Z$ 平面内会倾斜。将透镜阵列在 $Y-Z$ 平面内的倾斜也作为变量进行优化,透镜单元绕局部 Z 轴旋转的角度 Y 如图 8 所示。用 Zernike 面形优化后的透镜前后表面曲率如图 9 所示,用 Zernike 面形优化后增加的条纹 Zernike 项如图 10 所示,可以发现,Zernike 面形引入的非对称矢高可以校正整流罩引入的非对称像差。

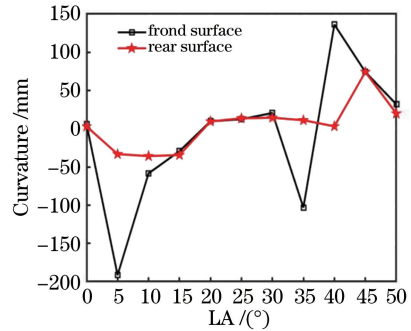


图 9 Zernike 多项式面形优化后各 LA 透镜阵列表面的曲率
Fig. 9 Curvatures of each LA lens array surface after Zernike polynomial surface shape optimization

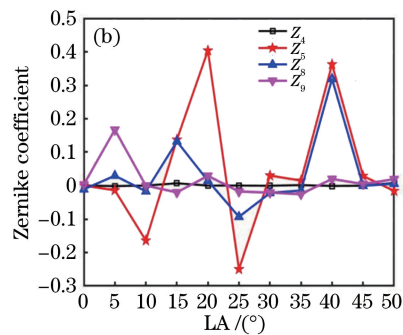
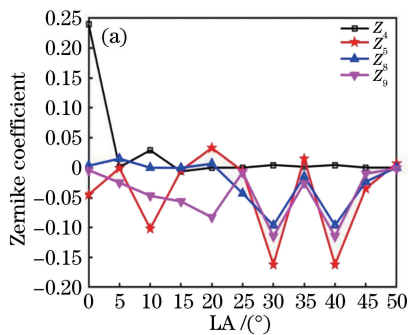


图 10 面形优化后的 Zernike 系数变化曲线。(a)阵列前表面;(b)阵列后表面

Fig. 10 Change curves of Zernike coefficients after surface shape optimization. (a) Front surface of the array; (b) rear surface of the array

图 11 为不同 LA 的 Zernike 系数变化情况,可以发现,LA 为 25° 和 50° 时,子午像散 Z_5 有明显减少,其他 LA 情况下,子午像散 Z_5 的变化不明显,但均小于 0.15。由于探测器的位置是固定的,因此,还需校正共形整流罩引入的动态离焦误差。从图

11 可以发现,LA 为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 时,离焦误差通过透镜阵列校正后均小于 0.1。部分 LA 处的调制传递函数(MTF)如图 1 所示,从 LA 为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 时光学系统在 22 lp/mm 处的 MTF 可以发现, 10° 与 40° 边缘视角系统的 MTF 略低,分别为 0.60 与 0.61,其他情

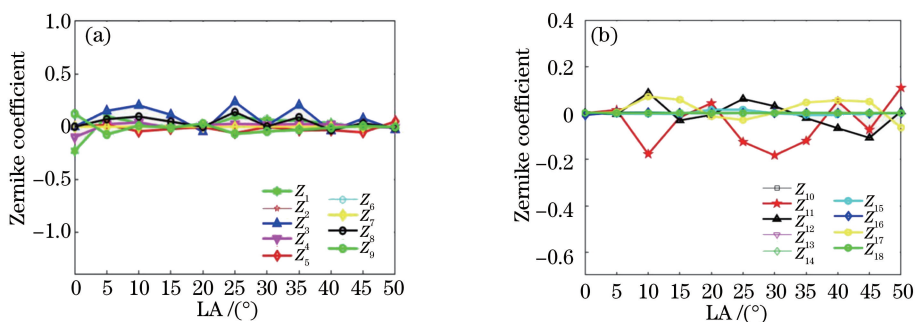


图 11 面形优化后共形光学系统 Zernike 系数与 LA 的关系。(a) $Z_1 \sim Z_9$; (b) $Z_{10} \sim Z_{18}$
 Fig. 11 Relationship between Zernike coefficient and LA of conformal optical system after surface shape optimization. (a) $Z_1 \sim Z_9$; (b) $Z_{10} \sim Z_{18}$

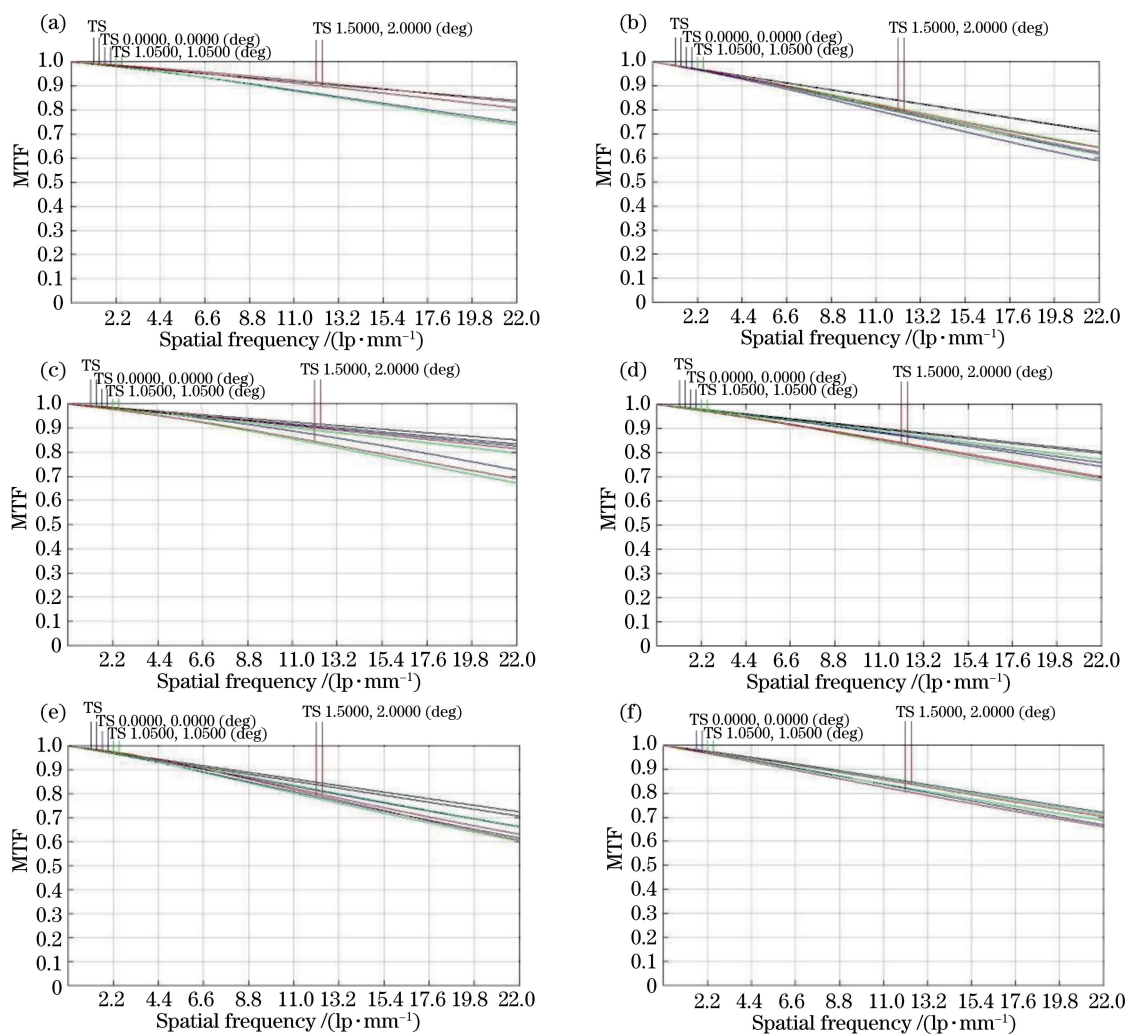


图 12 不同 LA 时光学系统的 MTF。(a) 0° ; (b) 10° ; (c) 20° ; (d) 30° ; (e) 40° ; (f) 50°

Fig. 12 MTF of the optical system at different LA. (a) 0° ; (b) 10° ; (c) 20° ; (d) 30° ; (e) 40° ; (f) 50°

况下系统的 MTF 均大于 0.65, 接近衍射极限, 这表明各子扫描视角的像差均得到了校正。

3.5 二维自由曲面透镜阵列的设计

共形整流罩为非旋转对称结构, 因此可由多个

自由曲面透镜构成二维透镜阵列。由共形整流罩的几何特性可知, 如果多个不同 LA 的透镜单元中心在同一环上, 且距离图 13 中透镜单元 1 的距离相同, 则可将这些透镜单元分为一组。如图 13 中透镜

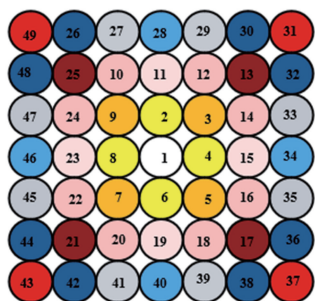


图 13 二维透镜阵列的结构

Fig. 13 Structure of the two-dimensional lens array

单元1为左右与上下方向均为 0° 对应的透镜单元；

透镜单元 2 为左右方向 0° 和上下方向 5° 对应的透镜单元, 与透镜单元 4、6、8 分为一组; 透镜单元 11 为左右方向 0° 和上下方向 10° 对应的透镜单元, 与透镜单元 15、19、23 对应的透镜单元对称分为一组; 透镜单元 28 为左右方向 0° 和上下方向 15° 对应的透镜单元, 与透镜单元 34、40、46 分为一组。重复该过程并添加其他配置, 用 ZEMAX 软件构建多个透镜阵列组成的二维自由曲面透镜阵列如图 14 所示(左右方向为 $0^\circ \sim 50^\circ$, 上下方向为 $-10^\circ \sim 10^\circ$), 进行动态像差校正后二维自由曲面透镜阵列的前后表面矢高如图 15 所示。

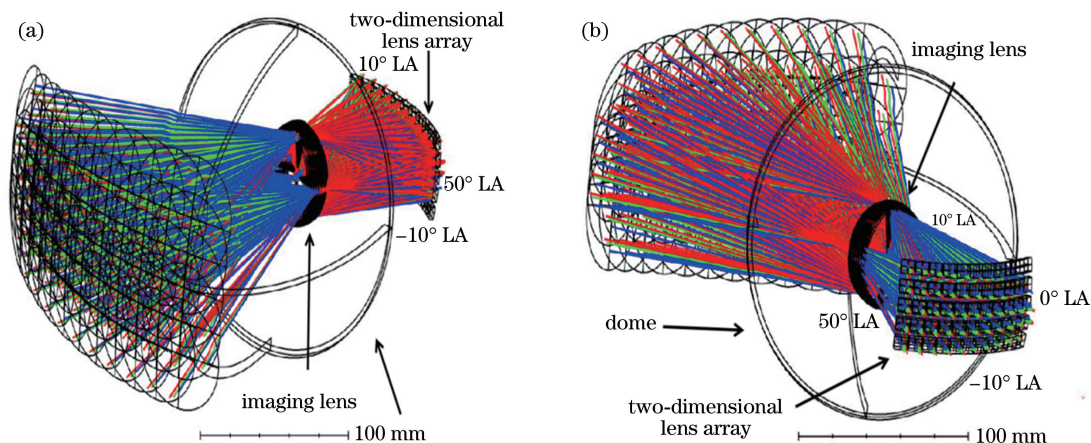


图 14 二维透镜阵列共形光学系统的结构。(a)前表面;(b)后表面

Fig. 14 Structure of a two-dimensional lens array conformal optical system. (a) Front surface; (b) rear surface

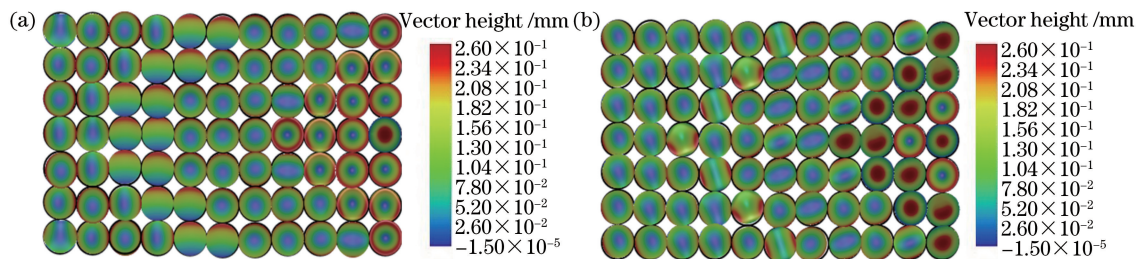


图 15 二维自由曲面透镜阵列的表面矢高。(a)前表面;(b)后表面

Fig. 15 Surface vector height of a two-dimensional free-form lens array. (a) Front surface; (b) rear surface

图 16 为基于二维自由曲面透镜阵列的共形

整流罩光学系统, 首先, 将万向型扫描成像透镜放

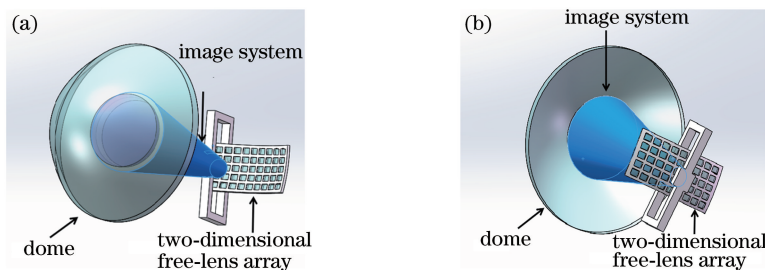


图 16 基于二维自由曲面透镜阵列的共形整流罩光学系统。(a)前表面;(b)后表面

Fig. 16 Conformal dome optical system based on a two-dimensional free-form lens array.

(a) Front surface; (b) rear surface

在整流罩后,且每个自由曲面透镜单元的口均大于 8 mm;然后,将透镜单元拼接在一起,形成二维自由曲面透镜阵列并固定在像面前;最后,用矩形结构在二维自由透镜阵列前后将万向型扫描成像透镜和探测器相连,使探测器对准镜筒。当万向型扫描成像系统旋转时,探测器会同步进行旋转,且二维自由曲面透镜阵列是固定的,保证了系统的稳定性。

4 结 论

针对现有静态校正方法不能校正大长径比、大扫描视角共形整流罩引入的动态像差问题,提出了一种基于自由曲面透镜阵列的静态校正方法,并通过设计实例验证了该方法的可行性。设计结果表明,当 LA 为 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 时,用本方法校正后系统的像差有大幅度减小,且 22 lp/mm 处的 MTF 均大于 0.60。此外,由于透镜阵列是固定的,没有任何运动部件,打破了传统静态校正方法无法校正大扫描视角像差的限制,可适用于大长径比、大扫描视角的系统,且能保证系统的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Dang F Y. Research on dynamic aberration characteristics and correction methods of conformal fairing[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2018.
党凡阳. 共形整流罩动态像差特性及校正方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [2] Wang C. Research of aberration correction technology for optical system with aspheric dome [D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014.
王超. 含非球面头罩的光学系统像差校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2014.
- [3] Jiang Y. Aberration correction discuss of conformal dome[D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2013.
姜洋. 共形光学系统像差校正研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
- [4] Sun J X, Sun Q, Lu Z W, et al. Characteristic analysis and correction of conformal radome aberration[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29 (5): 713-718.
- 孙金霞, 孙强, 卢振武, 等. 共形整流罩像差特性分析及校正方法[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 713-718.
- [5] Zhang Y Q, Chang J, Pan G Q, et al. Analysis of influence factors on aberrations introduced by quadric conformal domes [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6): 965-972.
张运强, 常军, 潘国庆, 等. 二次曲面共形整流罩像差影响因素分析[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 965-972.
- [6] Zhang W, Wang D S, Qin L Q, et al. Design on surface shape of conicoidal conformal optical domes [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222006.
张旺, 汪东生, 秦兰琦, 等. 二次曲面共形光学整流罩面型设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222006.
- [7] Kunick J M, Chen C W, Cook L G, et al. Dynamic aberration corrector for conformal windows: US5526181 [P/OL]. 1996-06-11 [2020-09-21]. <https://www.freepatentsonline.com/5526181.html>.
- [8] Shannon R R. Overview of conformal optics [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3705: 180-188.
- [9] Zhao C Z, Cui Q F, Piao M X, et al. Two-stage static correction of aircraft conformal window aberration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (2): 0216001.
赵春竹, 崔庆丰, 朴明旭, 等. 飞机共形窗口像差的二级静态校正[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0216001.
- [10] Knapp D, Sparrold S W. Optical system with asymmetric optical corrector: US6310730 [P/OL]. 2001-10-30 [2020-09-25]. <https://www.freepatentsonline.com/6310730.html>.
- [11] Chang J, He W B, Feng S L, et al. Design of conformal dome optical system with large fineness ratio [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(3): 333-335.
常军, 何伍斌, 冯树龙, 等. 大长径比整流罩光学系统设计[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3): 333-335.
- [12] Jiang Y, Sun Q, Sun J X, et al. Design of infrared staring conformal optical system with wide field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (6): 1575-1580.
姜洋, 孙强, 孙金霞, 等. 大视场凝视型红外共形光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1575-1580.
- [13] Wang C, Zhang X, Wang L J, et al. Design method for infrared elliptical dome optical system with wide field-of-regard[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(3): 259-264.
王超, 张新, 王灵杰, 等. 大扫描视场红外椭球形整

- 流罩光学系统设计方法[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(3): 259-264.
- [14] Xie Q M, Li Y W, Pan S C, et al. The development and application of the materials for infrared windows and domes[J]. Infrared Technology, 2012, 34(10): 559-567.
谢启明, 李奕威, 潘顺臣, 等. 红外窗口和整流罩材料的发展和应用[J]. 红外技术, 2012, 34(10): 559-567.
- [15] Zhao C Z, Cui Q F. Aircraft conformal window correction with tilted and decentered rotationally symmetrical elements[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(10): 1022004.
赵春竹, 崔庆丰. 基于倾斜偏心旋转对称元件的飞机共形窗口像差校正[J]. 光子学报, 2015, 44(10): 1022004.
- [16] Zhao C Z, Cui Q F, Mao S, et al. Aberration and boresight error correction for conformal aircraft windows using the inner window surface and tilted fixed correctors[J]. Applied Optics, 2016, 55(10): 2626-2633.
- [17] Zhang W, Zuo B J, Chen S Q, et al. Design of conformal dome inner surface shape beneficial to aberration correction[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122001.
张旺, 左宝君, 陈守谦, 等. 利于像差校正的共形整流罩内表面面形设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122001.
- [18] Zhao C Z, Cui Q F, Zhao Y M, et al. Design of fuselage conformal optical system based on freeform correctors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022010.
赵春竹, 崔庆丰, 赵渊明, 等. 基于自由曲面校正器的机身共形光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022010.