

# 光学学报

## 基于固定校正板和透镜阵列的机载共形窗口像差校正

郭玉<sup>1</sup>, 赵春竹<sup>2\*\*</sup>, 朴明旭<sup>1\*</sup>, 郑汉青<sup>1</sup>, 顾姗姗<sup>1</sup>, 句源<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 北京大学分子医学研究所, 北京 100871

**摘要** 为了校正大扫描视场机载共形窗口引入的像差, 提出一种基于固定校正板和透镜阵列的静态校正方法。首先使用固定校正板校正静态像差; 然后在像面前安置固定的透镜阵列, 利用透镜阵列中的各个透镜单元分别校正不同扫描角度的动态像差; 最后基于所提方法设计应用在机载共形光学系统中的像差校正器。设计结果表明, 所提方法在  $\pm 42^\circ$  的扫描视场范围内能够良好地校正共形窗口引入的像差。与其他动态或静态校正方法相比, 所提方法可以实现大扫描视场机载共形光学系统像差的校正, 同时降低机载共形光学系统的质量, 提高系统的稳定性。

**关键词** 光学设计; 共形光学; 共形窗口; 像差校正; 透镜阵列

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0222002

### Aberration Correction of Onboard Conformal Window Based on Fixed Corrector and Lens Array

Guo Yu<sup>1</sup>, Zhao Chunzhu<sup>2\*\*</sup>, Piao Mingxu<sup>1\*</sup>, Zheng Hanqing<sup>1</sup>, Gu Shanshan<sup>1</sup>, Ju Yuan<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Institute of Molecular Medicine, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** In this paper, a static correction method based on a fixed corrector and a lens array is proposed to correct the aberrations introduced by an onboard conformal window in a large scanning field of view. To be specific, first, a fixed corrector is used to correct the static aberrations. Then, a fixed lens array is placed in front of the image plane and the lens units in the array are respectively employed to correct the dynamic aberrations at different scanning angles. Finally, an aberration corrector in an onboard conformal optical system is designed based on the proposed method. The design results show that the proposed method can well correct the aberrations introduced by the conformal window in the scanning field of view of  $\pm 42^\circ$ . Compared with other dynamic or static correction methods, the proposed method can realize the aberration correction of an onboard conformal optical system in a large scanning field of view, reduce the mass of the system, and improve the stability of the system.

**Key words** optical design; conformal optics; conformal window; aberration correction; lens array

**OCIS codes** 220.3620; 220.1000; 220.1250

## 1 引言

共形窗口是指外形与主平台轮廓相吻合的光学窗口, 常用在飞机上以减少空气阻力, 提高整体性

能<sup>[1-3]</sup>, 但其通常会引入大量的静态像差和动态像差<sup>[4-5]</sup>, 而动态像差会随着扫描角度(LA)的变化而改变, 因此共形光学系统的设计难点在于如何校正动态像差。

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-07-20; 录用日期: 2020-08-12

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)、长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2017-09)

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

目前,像差的校正方法有动态校正方法和静态校正方法两种。动态校正方法是在成像系统中添加由多个可变光学元件组成的动态校正器,并通过对光学元件进行平移和旋转操作来校正动态像差<sup>[6-9]</sup>,该方法能够实现大扫描视场中动态像差的校正,但这会增加光学机械结构的复杂度并且降低光学系统的稳定性。静态校正方法是在共形窗口后面添加几个由固定光学元件组成的静态校正器<sup>[10-17]</sup>以校正像差,该方法可以保证光电系统的稳定性,但只能校正较小扫描视场的动态像差,因此无法应用在大扫描视场的机载共形光学系统中。结合飞机的应用,目前更需要一种具有扫描视场大、结构简单、质量轻和稳定性强的机载共形光学系统。

本文提出一种使用固定校正板与透镜阵列来校正机载共形窗口像差的静态校正方法。首先将校正板固定在扫描成像系统前并跟随成像系统旋转,这样可以校正共形窗口的静态像差。然后将一个透镜阵列固定在像面前,每个 LA 引入的像差由透镜阵列中相应的透镜单元单独校正,这可以校正共形窗口

的动态像差。最后采用该方法设计一个应用在机载共形光学系统中的像差校正器。设计结果表明,在 $\pm 42^\circ$ 的扫描视场范围内,共形窗口引入的静态像差和动态像差都可以得到校正。

## 2 设计原理

基于固定校正板与透镜阵列的共形窗口像差校正原理,如图 1 所示。首先将校正板固定在扫描成像系统前,使其跟随扫描成像系统转动,选择适合的面形以校正共形窗口引入的静态像差<sup>[7]</sup>。由于共形窗口的面形复杂,且光束通过共形窗口的有效面积随着 LA 的改变而改变,因此共形窗口引入的像差随着 LA 的改变呈动态变化,但是对于每一个 LA,窗口引入的像差是静态的。如果将每一个 LA 视为一个成像通道,则由共形窗口引入的动态像差可转换为每一个成像通道的静态像差。然后在每个成像通道的非重叠区域可以插入一个透镜单元,通过优化表面参数和旋转透镜单元来实现各通道静态像差的校正。最后,使用由透镜单元组成的透镜阵列来校正共形窗口引入的动态像差。

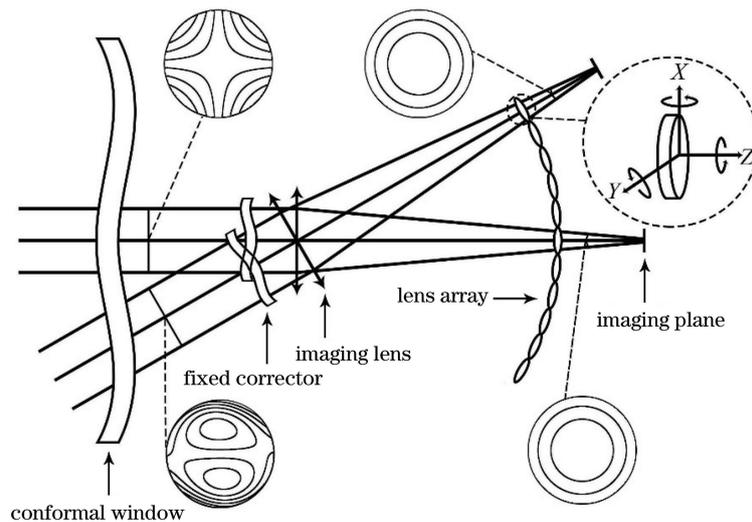


图 1 基于固定校正板与透镜阵列的共形窗口像差校正原理图

Fig. 1 Principle diagram of aberration correction for conformal window based on fixed correction plate and lens array

为了确保各成像通道之间互不干扰,应严格控制透镜阵列的植入位置。图 2 为相邻成像通道的光路结构。点  $M$  之后的相邻成像通道之间没有重叠,因此在点  $M$  之后植入透镜阵列可以避免各个通道的图像串扰。点  $M$  的位置可通过如下过程推导。

由于  $\triangle AOC \sim \triangle MNC$ ,  $\triangle OEN \sim \triangle OFC$ , 则可以得到

$$\frac{|AO|}{|MN|} = \frac{|CO|}{|CN|} = \frac{f}{f-l}, \quad (1)$$

式中:  $l$  为从扫描光学系统的旋转点到点  $M$  的横向

距离;  $f$  为成像系统的焦距。由图 2 可以得到

$$|ME| = |MN| + |NE|, \quad (2)$$

$$D = 2|AO|, \quad (3)$$

式中:  $D$  为成像系统的入瞳直径。在  $\triangle OME$  和  $\triangle ONE$  中,有

$$|ME| = l \tan(\theta/2), \quad (4)$$

$$|NE| = l \tan \alpha, \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为成像系统的半视场;  $\theta$  为相邻成像通道之间的夹角。由(1)~(5)式可以得到点  $M$  的位置,表达式为

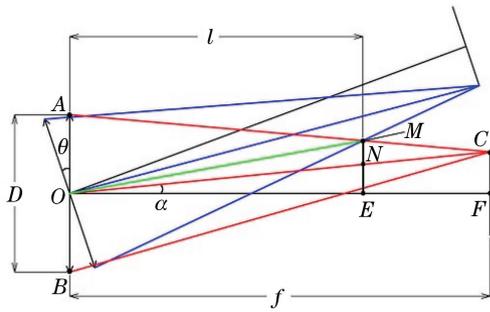


图2 相邻成像通道的光路结构

Fig. 2 Optical path structure of adjacent imaging channels

$$l = \frac{D}{D/f - 2\tan\alpha + 2\tan(\theta/2)} \quad (6)$$

### 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窗口和一

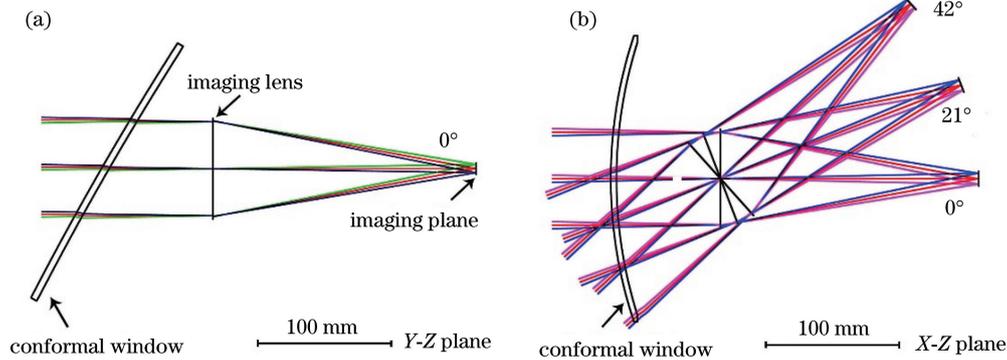


图3 共形光学系统的初始结构。(a) Y-Z 平面内, LA 为 0°; (b) X-Z 平面内, LA 为 0°、21° 和 42°

Fig. 3 Initial structure of conformal optical system. (a) In Y-Z plane, LA is 0°; (b) in X-Z plane, LA is 0°, 21° and 42°

将初始的共形光学系统出瞳处的波前按条纹 Zernike 多项式进行拟合<sup>[18-22]</sup>, 通过分析各 Zernike 项的系数变化, 可以实现对共形光学系统像差的分析。不同 LA 的 Zernike 系数变化情况, 如图 4 所

个扫描理想透镜组成, 如图 3 所示。飞机共形窗口的参数参考文献[9], 共形窗口的外表面形状为双曲率面, 可以描述为

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - c_x^2 x^2 - c_y^2 y^2}}, \quad (7)$$

式中:  $z$  为表面矢高;  $c_x$  和  $c_y$  分别为 X 和 Y 方向的曲率;  $(x, y)$  为点的坐标。将  $R_x$  和  $R_y$  分别定义为 X 和 Y 方向的曲面半径, 因此  $R_x = 1/c_x$  和  $R_y = 1/c_y$ , 则  $R_x = 304.8 \text{ mm}$  和  $R_y = 2438.4 \text{ mm}$ 。扫描透镜的焦距为 200 mm, F 数为 2.8, 视场为  $2.4^\circ(X) \times 1.8^\circ(Y)$ , 设计的激光波长  $\lambda$  为 632.8 nm。若要满足空气动力学性能, 则飞机的共形窗口在 Y-Z 平面上倾斜  $30^\circ$ 。在 X-Z 平面上, 使扫描透镜在共形窗口后旋转, 可以获得  $\pm 42^\circ$  的大扫描视场范围。倾斜的共形窗口关于 Y-Z 平面对称, 所以在设计过程中只需考虑  $0^\circ \sim 42^\circ$  的扫描范围。

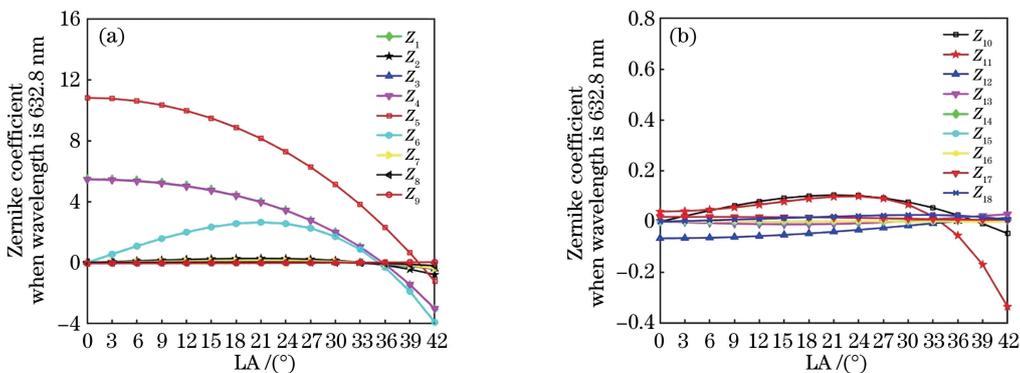


图4 Zernike 系数与 LA 的关系。(a)  $Z_1 \sim Z_9$  的 Zernike 系数; (b)  $Z_{10} \sim Z_{18}$  的 Zernike 系数

Fig. 4 Relationship between Zernike coefficient and LA. (a) Zernike coefficient of  $Z_1 \sim Z_9$ ; (b) Zernike coefficient of  $Z_{10} \sim Z_{18}$

示。其中  $Z_1$  为一个不影响图像质量的常数;  $Z_4$  为离焦, 这不是真正的像差, 但影响像面的最佳位置;  $Z_5$  和  $Z_6$  分别为 LA 在  $0^\circ$  和  $45^\circ$  的像散, 这是共形窗口引入的主要像差。从图4可以看到,  $Z_1$ 、 $Z_4$ 、 $Z_5$  和  $Z_6$  值

随着 LA 的增加而显著变化。当 LA 为  $0^\circ$ 、 $21^\circ$  和  $42^\circ$  时,像散全视场显示<sup>[23]</sup>如图 5 所示。从图 5 可以看

到,共形窗口在整个视场中引入大量的像散,且像散的大小和方向随着 LA 的改变呈动态变化。

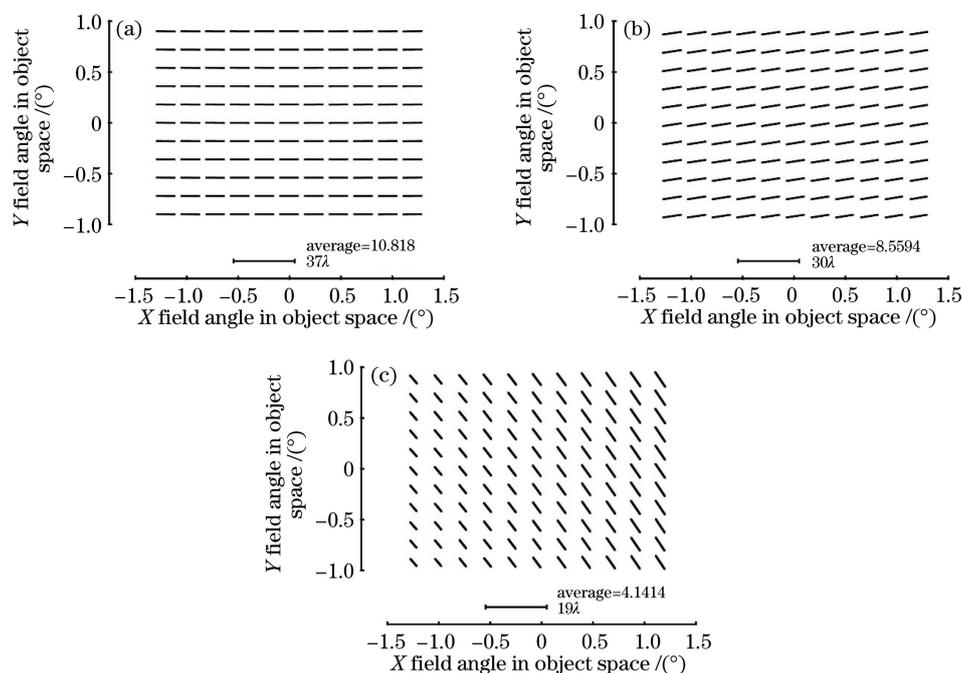


图 5 不同 LA 的像散全视场显示。(a)  $0^\circ$ ; (b)  $21^\circ$ ; (c)  $42^\circ$

Fig. 5 Full field of view display with different LA. (a)  $0^\circ$ ; (b)  $21^\circ$ ; (c)  $42^\circ$

### 3.2 固定校正板的设计

将校正板固定在理想透镜前并跟随其旋转以校正共形窗口产生的静态像差,加入固定校正板的共形光学系统结构如图 6 所示。固定校正板采用双曲率面,使用 Code V 软件<sup>[18]</sup>来优化  $R_x$  和  $R_y$ , 优化后的前表面  $R_{XF} = 2888.58 \text{ mm}$  和  $R_{YF} =$

$9510.29 \text{ mm}$ , 后表面  $R_{XB} = 2904.21 \text{ mm}$  和  $R_{YB} = -14020.49 \text{ mm}$ 。优化加入固定校正板后的共形光学系统,不同 LA 的 Zernike 系数变化情况,如图 7 所示。从图 7 可以看到,当 LA 为  $0^\circ$  时像散减少,当 LA 为  $42^\circ$  时像散增加,说明静态像差得到校正,而且平衡整个扫描视场的像差。

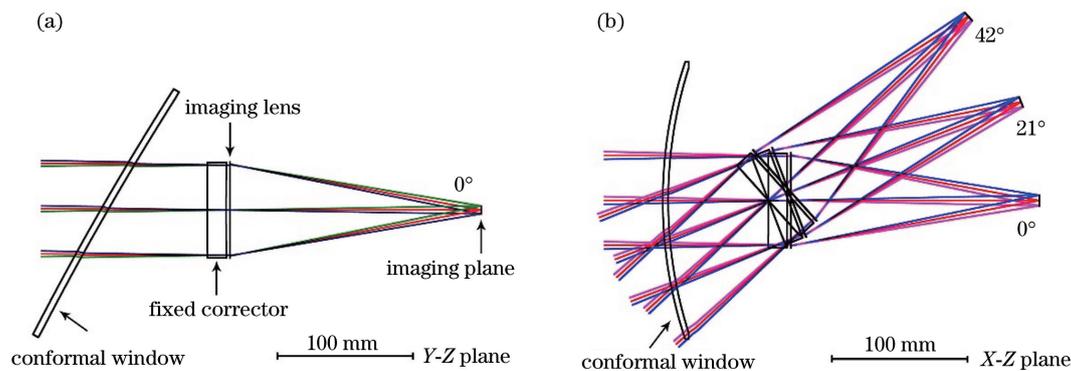


图 6 加入固定校正板后的共形光学系统结构。(a) Y-Z 平面内, LA 为  $0^\circ$ ; (b) X-Z 平面内, LA 为  $0^\circ$ 、 $21^\circ$  和  $42^\circ$

Fig. 6 Conformal optical system structure after adding fixed calibration plate. (a) In Y-Z plane, LA is  $0^\circ$ ;

(b) in X-Z plane, LA is  $0^\circ$ ,  $21^\circ$  and  $42^\circ$

### 3.3 透镜阵列的设计

根据第 2 节的分析,可以使用固定透镜阵列来校正共形窗口引入的动态像差。扫描透镜的瞬时视场为  $2.4^\circ(X) \times 1.8^\circ(Y)$ , 当各通道 LA 间隔为  $2.4^\circ$

时,将导致各通道的光线完全交叠,无法植入透镜阵列。考虑到透镜阵列的安装,则透镜阵列的植入位置应与像面有一定的距离,并且各透镜单元需留有边厚,因此选取的 LA 间隔为  $3^\circ$ 。采用(6)式可以计

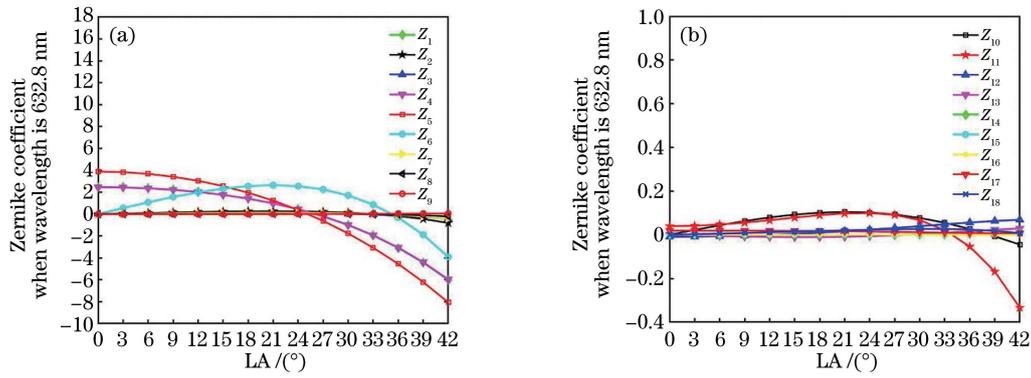


图7 加入固定校正板后的 Zernike 系数与 LA 的关系。(a)  $Z_1 \sim Z_9$  的 Zernike 系数;(b)  $Z_{10} \sim Z_{18}$  的 Zernike 系数

Fig. 7 Relationship between Zernike coefficient and LA after adding fixed calibration plate. (a) Zernike coefficient of  $Z_1 \sim Z_9$ ; (b) Zernike coefficient of  $Z_{10} \sim Z_{18}$

算  $l = 194.3$  mm, 因此为了避免相邻成像通道的视场重叠, 透镜阵列需放在扫描透镜后 194.6 mm 处, 并且透镜阵列的每个透镜单元对应一个成像通道。为了校正共形窗口引入的像差, 各透镜单元采用双曲率面。通过改变  $R_x$  和  $R_y$  可以改变子午像点和弧矢像点的位置, 从而实现像差的校正。单独优化各透镜单元的  $R_x$  和  $R_y$ , 优化后的共形光学系统如图 8 所示。各透镜单元前后表面的  $R_x$  和  $R_y$  如图 9 所示, 其中横坐标为透镜单元对应的 LA。不同 LA 的 Zernike 系数变化情况, 如图 10 所示。从

图 7 和图 10 可以看到,  $0^\circ$  像散( $Z_5$ )在每一个 LA 显著减少, 但  $45^\circ$  像散( $Z_6$ )变化较小, 原因在于探测器的位置是固定的, 所以共形窗口引入的动态离焦也需要被校正, 使用透镜阵列可以很好地校正动态离焦。图 11 为加入透镜阵列后, LA 在  $0^\circ$ 、 $21^\circ$  和  $42^\circ$  的残余像散全视场显示。从图 10 和图 11 可以看到, 像散没有被完全校正, 原因在于共形窗口引入像散的方向随着 LA 的增加逐渐倾斜, 双曲率面引入像散的方向具有局限性, 这是由两者无法相互抵消所导致<sup>[23]</sup>。

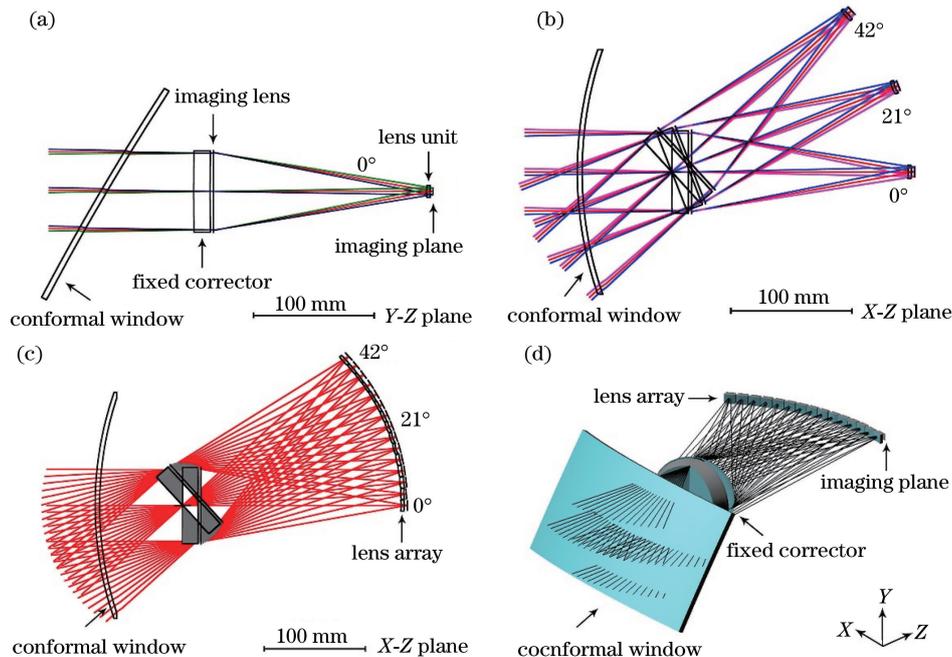


图8 加入透镜阵列后的共形光学系统结构。(a) Y-Z 平面内, LA 为  $0^\circ$ ; (b) X-Z 平面内, LA 为  $0^\circ$ 、 $21^\circ$  和  $42^\circ$ ; (c) X-Z 平面内, LA 为  $0^\circ \sim 42^\circ$ ; (d) LA 为  $0^\circ \sim 42^\circ$  的 3D 结构

Fig. 8 Conformal optical system structure after adding lens array. (a) In Y-Z plane, LA is  $0^\circ$ ; (b) in X-Z plane, LA is  $0^\circ$ ,  $21^\circ$  and  $42^\circ$ ; (c) in X-Z plane, LA is  $0^\circ \sim 42^\circ$ ; (d) 3D structure of LA is  $0^\circ \sim 42^\circ$

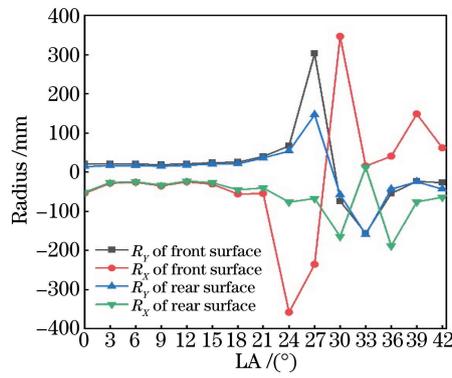


图9 优化后的每个透镜单元的  $R_x$  与  $R_y$

Fig. 9  $R_x$  and  $R_y$  of each lens unit after optimization

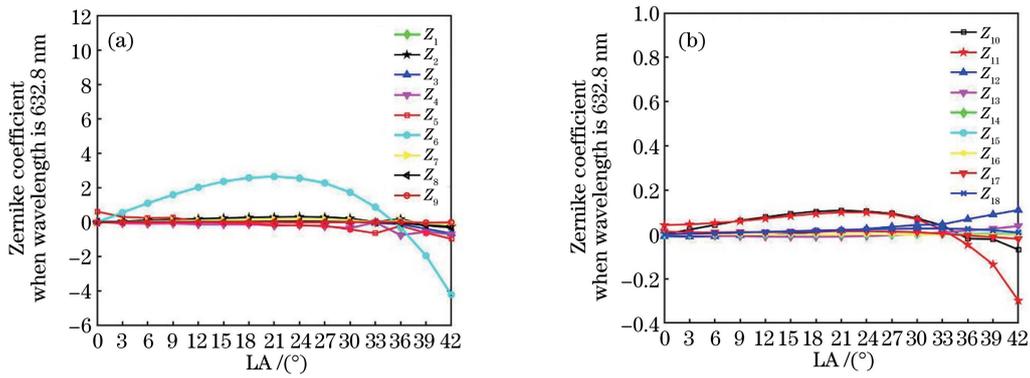


图10 加入透镜阵列后的 Zernike 系数与 LA 的关系。(a)  $Z_1 \sim Z_9$  的 Zernike 系数;(b)  $Z_{10} \sim Z_{18}$  的 Zernike 系数

Fig. 10 Relationship between Zernike coefficient and LA after adding lens array. (a) Zernike coefficient of  $Z_1 \sim Z_9$  ;

(b) Zernike coefficient of  $Z_{10} \sim Z_{18}$

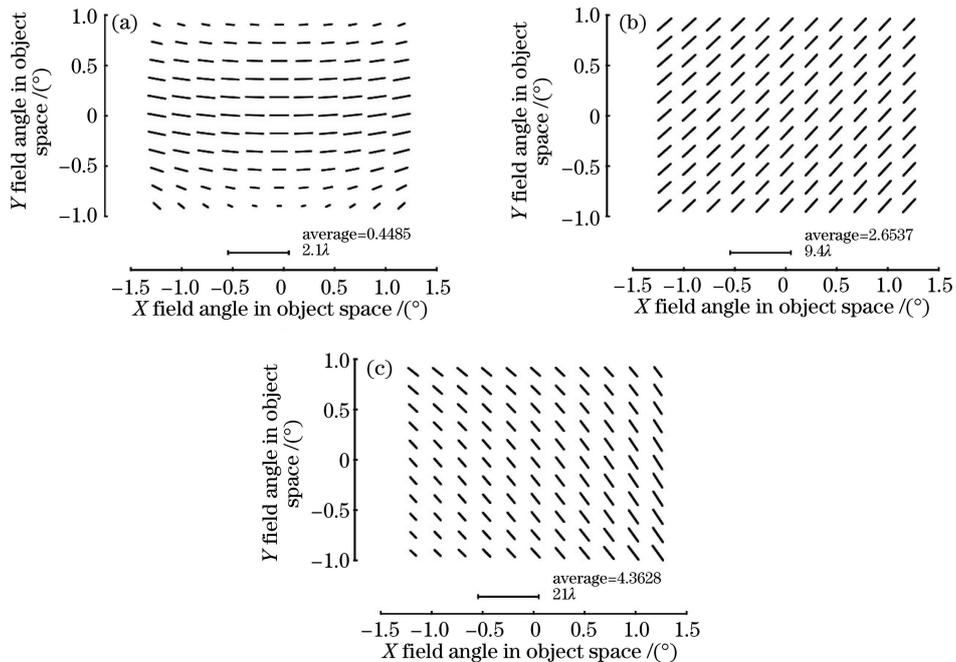


图11 加入透镜阵列后在不同 LA 的残余像散全视场显示。(a)  $0^\circ$ ;(b)  $21^\circ$ ;(c)  $42^\circ$

Fig. 11 Full field of view display of residual astigmatism in different LA after adding lens array. (a)  $0^\circ$  ; (b)  $21^\circ$  ; (c)  $42^\circ$

为了校正共形光学系统逐渐倾斜的像散,对透镜阵列中的每个透镜单元进行旋转。透镜单元绕Z轴旋转后,Zernike系数与LA的关系如图12所示。从图12可以看到,剩余的Zernike系数被减少到小于一个波长量级,与初始共形光学系统的Zernike系数相比减小很多。当LA为 $0^\circ$ 、 $21^\circ$ 和 $42^\circ$ 时,残余像散全视

场显示如图13所示。从图13可以看到,倾斜的像散可以被校正。图14为各透镜单元的 $R_x$ 和 $R_y$ ,图15为每个透镜单元绕Z轴的旋转角度。由于镜像的关系,每个透镜单元在负LA处的旋转方向应与正LA的旋转方向相反。另外,由于共形窗口和透镜阵列的光焦度极小,因此共形光学系统不会引入色差。

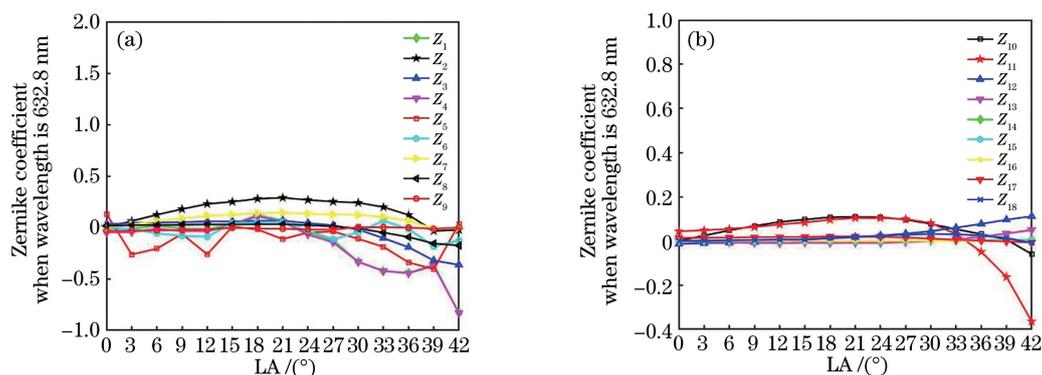


图12 旋转透镜单元后的Zernike系数与LA的关系。(a)  $Z_1 \sim Z_9$ 的Zernike系数;(b)  $Z_{10} \sim Z_{18}$ 的Zernike系数  
Fig. 12 Relationship between Zernike coefficient and LA after rotating lens unit. (a) Zernike coefficient of  $Z_1 - Z_9$ ;  
(b) Zernike coefficient of  $Z_{10} - Z_{18}$

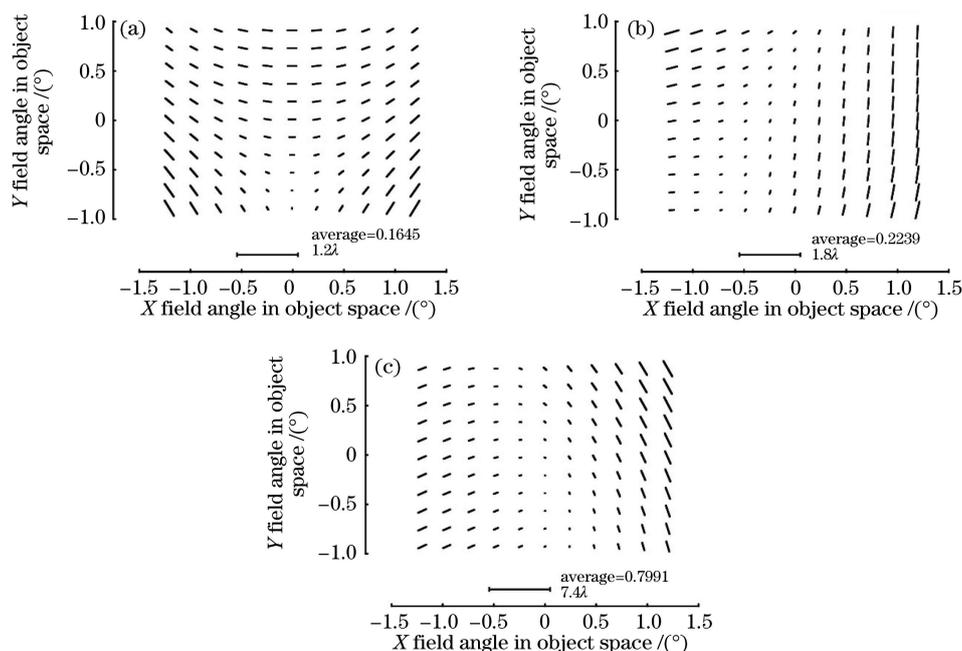


图13 旋转透镜阵列后在不同LA的残余像散全视场显示。(a)  $0^\circ$ ;(b)  $21^\circ$ ;(c)  $42^\circ$

Fig. 13 Full field of view display of residual astigmatism in different LA after rotating lens array. (a)  $0^\circ$ ; (b)  $21^\circ$ ; (c)  $42^\circ$

基于固定校正板和透镜阵列的共形光学系统结构如图16所示,其中CCD为电荷耦合器件。将固定校正板、扫描成像系统和探测器固定在一个镜筒中,并且在探测器前面切割一个矩形孔以植入固定的透镜阵列。当扫描成像系统旋转时,透镜阵列是固定不变的,这可以保证系统具有稳定性。扫描成像系统每间隔 $3^\circ$ 扫描一次,一个扫描周期完成后将

可以得到扫描视场范围为 $\pm 42^\circ$ 的信息。若扫描系统旋转到相邻两个成像通道之间时,光束将会到达透镜阵列中两个透镜单元连接的部分,而这部分光束无法成像,所以不能得到有用的信息。由于成像系统的孔径大,每个透镜单元的孔径均大于10 mm,因此将各透镜单元拼接在一起可以形成透镜阵列。

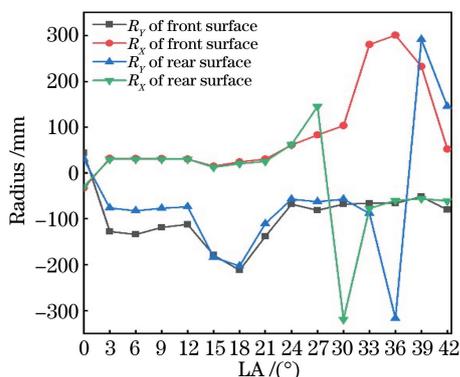
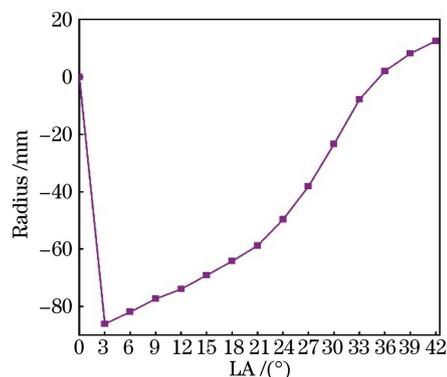
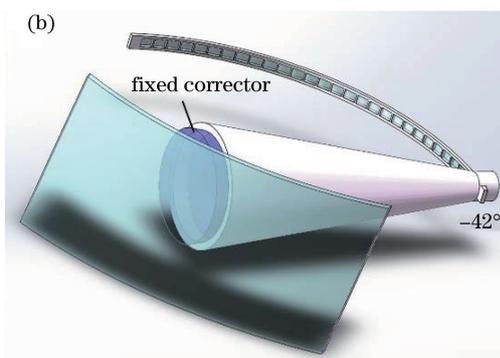
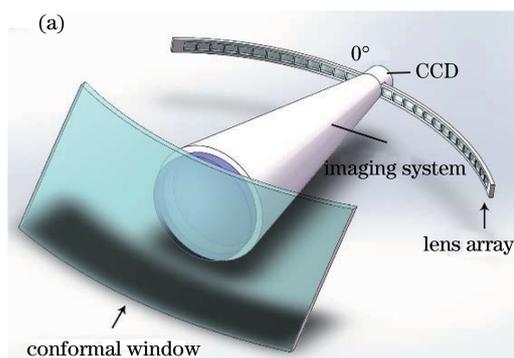
图 14 旋转优化后每个透镜单元的  $R_x$  与  $R_y$ Fig. 14  $R_x$  and  $R_y$  of each lens unit after rotation

图 15 每个透镜单元绕 Z 轴的旋转角度

Fig. 15 Rotation angle of each lens unit around Z axis

图 16 基于固定校正板和透镜阵列的共形光学系统结构。(a) LA 为  $0^\circ$ ; (b) LA 为  $-42^\circ$ Fig. 16 Conformal optical system structure based on fixed correction plate and lens array. (a) LA is  $0^\circ$ ; (b) LA is  $-42^\circ$ 

## 4 结 论

针对现有技术无法实现大扫描视场机载共形光学系统像差校正的需求,提出基于固定校正板和透镜阵列的静态校正方法。首先阐明这一静态校正方法的原理,并设计实例证明该方法的可行性。设计结果表明,将扫描成像通道分成多个成像通道,并对每个成像通道的像差进行单独校正,可以有效校正  $\pm 42^\circ$  的扫描视场范围内共形窗口引入的像差。与其他方法相比,所提方法的校正板和透镜阵列都是固定的,这可以实现大扫描视场机载共形光学系统像差的校正,降低系统的质量,提高系统的稳定性。

### 参 考 文 献

- [1] Shannon R R. Overview of conformal optics [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3705: 180-188.
- [2] Trotta P A. Precision Conformal optics technology program [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4375: 96-107.
- [3] Mills J P. Conformal optics: theory and practice [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4442: 101-107.
- [4] Hartmann R. Airborne FLIR optical window examples [J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1760: 86-96.
- [5] Thompson K P, Rodgers J M. Conformal optics: key issues in a developing technology [J]. Optics and Photonics News, 1997, 8(10): 24-30.
- [6] Kunick J M, Chen C W, Cook L G, et al. Dynamic aberration corrector for conformal windows: US5526181(A) [P/OL]. (1996-06-11) [2020-06-18]. <https://zhuanli.tianyancha.com/25c6104179eb4b0ab30648c4f4878da8>.
- [7] Chen C W. Optical system with two-stage aberration correction: US6091548 (A) [P/OL]. (2000-07-18) [2020-06-18]. <https://zhuanli.tianyancha.com/e7d014d2c1584f78b2866f48338014d7>.
- [8] Crowther B G, McKenney D B, Sparrold S W, et al. Optical system with dynamic optical correcto [EB/OL]. [2020-06-18]. <http://www4.drugfuture.com/uspat/download/US6201230.pdf>.
- [9] Marushin P H, Sasian J M, Lin T Y, et al. Demonstration of a conformal window imaging system: design, fabrication, and testing [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4375: 154-159.
- [10] Li D X, Lu Z W, Sun Q, et al. A research of conformal optical system based on Wassermann-Wolf

- equations[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(10): 5766-5771.
- 李东熙, 卢振武, 孙强, 等. 基于 Wassermann-Wolf 方程的共形光学系统设计研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(10): 5766-5771.
- [11] Li D X, Lu Z W, Sun Q, et al. Research on conformal optical system design using Wassermann-wolf principle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(4): 776-779.
- 李东熙, 卢振武, 孙强, 等. 利用 Wassermann-Wolf 原理设计共形光学系统[J]. *光子学报*, 2008, 37(4): 776-779.
- [12] Zhang P, Zhao C Z, Cui Q F. Design method of an aerial conformal optical window [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0622006.
- 张鹏, 赵春竹, 崔庆丰. 航空共形光学窗口的设计方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0622006.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Zhao C Z, Cui Q F. Boresight error correction of conformal optical window with tilted optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0422005.
- 赵春竹, 崔庆丰. 基于倾斜光学元件的共形光学窗口瞄视误差校正 [J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0422005.
- [17] Zhao C Z, Cui Q F, Mao S. 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.
- [18] Zhao C Z. Studies of static correction technology for aberrations and boresight error of aircraft conformal optical windows [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 22-37.
- 赵春竹. 飞机共形光学窗口像差和瞄视误差的静态校正技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016: 22-37.
- [19] Crowther B G, McKenney D B, Mills J P. Aberrations of optical domes [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3482: 48-61.
- [20] Kuang Y W, He Z P, Yuan L Y, et al. Design and development of beam transmitting system with far-field beam divergence angle of micro-radian dimension [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0605004.
- 况耀武, 何志平, 袁立银, 等. 微弧度量级远场发散角光束发射系统的设计与实现[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0605004.
- [21] Ni D W, Li X Y, Yang M Y, et al. Large field of view space-based optical detection system based on freeform surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1122003.
- 倪栋伟, 李旭阳, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场天基探测光学系统[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1122003.
- [22] Li B Y, Xiong H. Numerical research into aberration effect on efficiency of three-lens slit spatial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0822002.
- 李秉研, 熊晗. 像差对三镜型线聚焦滤波器效能影响的数值研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0822002.
- [23] Shi Y T, Zhang W, Chen S Q, et al. Research of aberration characteristics of conicoidal conformal optical domes [J]. *Optik*, 2015, 126(23): 3582-3588.