

doi: 10.3788/gzxb20154410.1022004

# 基于倾斜偏心旋转对称元件的飞机共形窗口像差校正

赵春竹, 崔庆丰

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

**摘要:**为校正飞机上双曲率面共形窗口在全扫描视场范围内引入的静态和动态像差,设计了一种静态校正器结构.该校正器由三个含有倾斜和偏心的旋转对称元件组成,且每个元件的表面面形为偶次非球面.校正器相对于共形窗口的位置是固定的,且结构紧凑稳定.基于矢量像差理论,对校正器进行光学设计,并阐述了该校正器的像差校正原理,结果表明:在各扫描视场位置,共形窗口与校正器引入的矢量像散可以相互抵消,使得共形窗口在全扫描视场范围内引入的静态和动态像散均得到校正,整个共形光学系统在可见光波段引入的波前像差均小于 1 个波长,调制传递函数曲线在 50 lp/mm 处值均大于 0.8.

**关键词:**光学设计;共形光学;像差校正;窗口;倾斜;偏心

中图分类号:O435

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)10-1022004-7

## Aircraft Conformal Window Correction with Tilted and Decentered Rotationally Symmetrical Elements

ZHAO Chun-zhu, CUI Qing-feng

(Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract:** To correct the static and dynamic aberrations introduced by a toroidally shaped conformal window on an aircraft across the full field of regard, a static corrector configuration was designed. The corrector is composed of three tilted and decentered elements with rotationally symmetric structures, and the surface of each element is aspheric. The corrector is fixed in position relative to the conformal window and its structure is compact and stable. Based on the vector aberration theory, the optical design of the corrector was presented and the aberration correction principle of the corrector was explained. The results show that, at any field of regard angle, the vectorial astigmatism introduced by the conformal window and the corrector are offsetted mutually, and the static and dynamic astigmatism introduced by the conformal window across the full field are corrected. The wavefront aberration of the conformal optical system is less than one wavelength at the visible spectrum, and the modulation transfer function values of the system are above 0.8 at 50 lp/mm.

**Key words:** Optical design; Conformal optics; Aberration correction; Window; Tilt; Decentration

**OCIS Codes:** 220.2740; 220.3620; 220.1000

## 0 引言

作为美国精密共形光学技术项目<sup>[1]</sup>的成果之一,亚利桑那大学光学科学中心研制了一种飞机共形窗口成像系统<sup>[2]</sup>.系统通过使用一对沿轴平移的柱面镜校

正一个双曲率面共形窗口在 30°全扫描视场范围内引入的静态和动态像差,这对柱面镜与其后的成像透镜共同在共形窗口后面做旋转运动以扫描视场.为了满足扫描视场的要求,系统中加入一个旋转平台,在 0°瞬时扫描视场位置,这对柱面镜随扫描视场角度变化做

基金项目:国家重大科技专项高分专项(No. 51-H34D01-8358-13/16)资助

第一作者:赵春竹(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为光学设计和共形光学. Email: cz\_zhao@sina. cn

导师(通讯作者):崔庆丰(1954-),男,教授,博导,主要研究方向为光学设计和衍射光学. Email: qf\_cui@163. com

收稿日期:2015-07-28;录用日期:2015-09-23

<http://www.photon.ac.cn>

相对平移运动,这样窗口在不同扫描视场位置引入的动态像差就得到校正.为了实现柱面镜旋转和平移运动同时进行,系统在旋转平台上加入了一个平移平台,使得光机结构复杂,体积大且系统稳定性降低.一个好的共形窗口像差校正方案应含有少的移动元件且结构紧凑稳定.如果这对柱面镜组成的动态校正器能够被相对窗口静止的静态校正器所取代,系统的稳定性将会被提高,结构将会被简化.

在共形光学设计领域,动态校正器主要用来校正共形窗口引入的随扫描视场变化而变化的动态像差.然而,并非只有动态校正器才能校正动态像差;例如,在椭圆形共形导弹整流罩的动态像差校正技术中,运用了多种静态校正器,包括弓形校正器<sup>[3-4]</sup>, Wassermann-Wolf 固定校正板<sup>[5-7]</sup>,衍射校正元件<sup>[8-10]</sup>和基于科丁顿方程的校正元件<sup>[11]</sup>等.但飞机共形窗口形状非对称且相对于其后的成像系统倾斜,因此用于校正旋转对称共形导弹整流罩像差的静态校正器并不适用于校正飞机共形窗口的像差.

本文设计了一种用于校正飞机共形窗口静态和动态像差的静态校正器结构和一个飞机共形光学系统,并评估了设计效果.

## 1 共形光学系统初始建模及像差分析

### 1.1 共形光学系统初始建模

设计中引用文献[2]中亚利桑那大学给出的飞机共形光学系统的相关参数,这些参数是基于飞机应用,由亚利桑那大学与雷神公司共同确定的.依据这些参数建模的共形光学系统如图 1.

共形窗口的材料为蓝宝石,全口径内等厚,厚度为 5.08 mm,形状为双曲率面,在子午和弧矢方向的曲率半径分别为 2438.4 mm 和 304.8 mm.共形窗口后面的成像系统用理想透镜表示,其焦距为 200 mm,  $F$  数为 2.8,全视场角为  $3^\circ$ .共形光学系统的工作波段为可见光(486.1~656.3 nm);同时,在实际应用中系统还要满足激光探测<sup>[12]</sup>的要求,故选择激光波长 632.8 nm 作为系统的设计波长.在设计优化过程中,采样波长为 486.1 nm, 587.6 nm, 632.8 nm, 656.3 nm, 波长权重均为 1.系统的光阑与理想透镜重合,探测器为一个 2/3 英寸的 CCD,放置在理想透镜的焦平面上.图 1 中光轴为  $Z$  轴,子午面为  $YZ$ ,弧矢面为  $XZ$ .在  $YZ$  平面内,共形窗口相对其后成像系统倾斜  $30^\circ$ ;在  $XZ$  平面内,共形窗口后面的成像系统相对窗口旋转来扫描视场,其全扫描视场范围为  $30^\circ$ .共形光学系统的物位于无限远,系统的设计目标是创建一个校正器,使系统在各扫描视场位置的波像差均小于 1 个波长<sup>[2]</sup>.由于共形窗口对称于  $YZ$  平面,因此只需考虑  $0^\circ \sim 15^\circ$  的扫描

视场位置.对于任一非零扫描视场位置,共形窗口的有效区域在任意方向都是非对称的.为满足非对称系统设计的要求,在  $3^\circ$  全视场角范围内,选取 25 个采样物方视场点参与优化.通过使用归一化视场坐标,这些采样视场点被表示在图 2 中的黑点处.

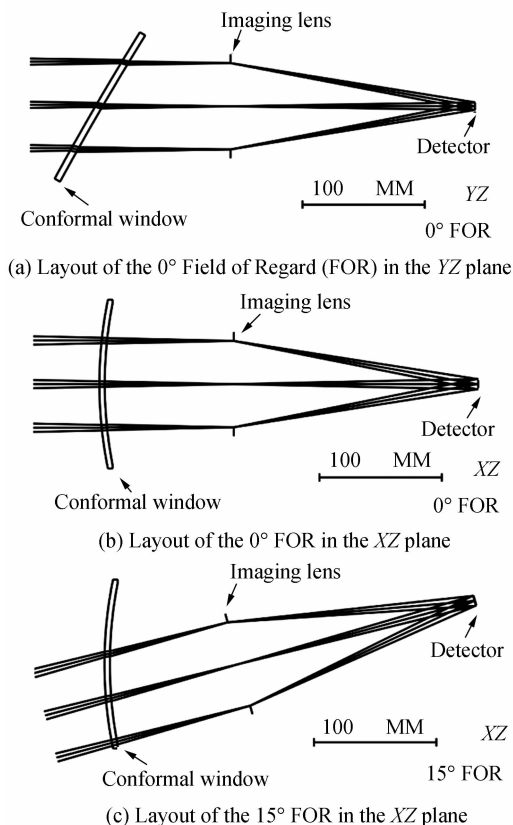


图 1 初始系统结构  
Fig. 1 Initial system layout

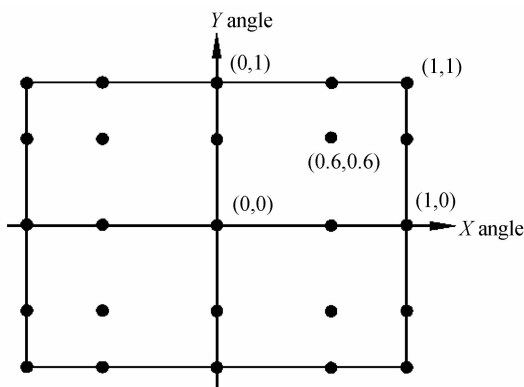


图 2  $3^\circ$  全视场角范围内采样视场点的归一化坐标  
Fig. 2 Normalized coordinates of the sampled field points across the  $3^\circ$  full FOV

### 1.2 共形窗口引入的像差

共形窗口在设计波长处引入的波像差如图 3.由于系统瞬时视场较小,在各视场角引入的波像差差别不大,因此在图 3 中仅给出  $0^\circ$  视场角引入的波像差情况.由图 3 可知,在  $0^\circ$  瞬时扫描视场,共形窗口引入了大约 23 个波长的像散;在  $15^\circ$  瞬时扫描视场,共形窗口

引入了大约 20 个波长的像散.

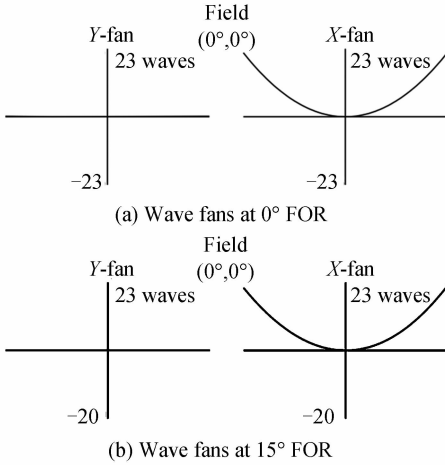


图 3 初始系统的波前图

Fig. 3 Wave fans of the initial system

基于 Zernike 像差理论,对共形窗口引入的静态像差和动态像差进行分析.通过光线追迹软件 Code V 将出瞳处的波前误差拟合成条纹 Zernike 多项式,多项式的每一项与某一种像差存在一一对应关系,每一项的系数则直接反应了引入相应像差的量值.图 4 为共形窗口在  $0^\circ$  视场角引入的主要 Zernike 像差随扫描视场的变化情况.由图 4 可知,在  $0^\circ$  扫描视场处,共形窗口引入的主要像差是  $0^\circ$  像散和离焦,而不引入  $45^\circ$  像散.随着扫描视场角的增大,共形窗口引入的  $0^\circ$  像散和离焦逐渐减小,但  $45^\circ$  像散却逐渐增大.

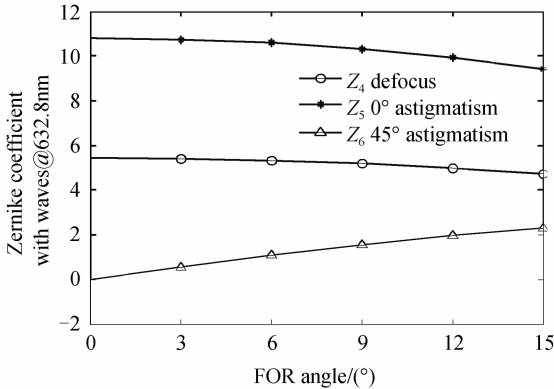


图 4 共形窗口引入的主要 Zernike 像差

Fig. 4 Predominant Zernike aberrations introduced by the conformal window

## 2 基于倾斜偏心旋转对称元件的共形窗口像差校正

### 2.1 光学设计

由图 3 和图 4 可知,像散主要是造成共形光学系统像质下降的像差,在静态校正器设计中,需尽可能校

正窗口引入的像散.对由多个倾斜偏心的旋转对称元件组成的静态校正器,依据矢量像差理论,含有倾斜偏心旋转对称元件光学系统的三级波像差表达式为<sup>[13]</sup>

$$W = \Delta W_{20}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \Delta W_{11}(\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \sum_j W_{040j}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + \sum_j W_{131j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \sum_j W_{222j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]^2 + \sum_j W_{220j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \sum_j W_{311j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)][(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}] \quad (1)$$

式中  $\boldsymbol{\rho}$  为孔径矢量,  $\mathbf{H}$  为视场矢量,  $\boldsymbol{\sigma}_j$  为倾斜偏心系统像差场中心相对于共轴系统像差场中心的偏移矢量.由式(1)可得倾斜偏心光学系统相对于中间焦平面的像散表达式为

$$W_{\text{asti}} = \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2] = \frac{1}{2} \left[ \sum_j W_{222j} \mathbf{H}^2 - 2\mathbf{H} \left( \sum_j W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j \right) + \sum_j W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j^2 \right] \cdot \boldsymbol{\rho}^2 = W_q + W_l + W_c \quad (2)$$

式中  $W_q$  为光学系统在共轴情况下的像散,与视场成平方关系;  $W_l$  和  $W_c$  是元件倾斜偏心引入的线性像散和常数项像散.令  $\mathbf{A}_{222} = \sum_j W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j$ ,  $\mathbf{B}_{222} = \sum_j W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j^2$ , 及相应归一化量  $\mathbf{a}_{222} = \mathbf{A}_{222} / W_{222}$ ,  $\mathbf{b}^2 = \mathbf{B}_{222} / W_{222} - \mathbf{a}_{222}^2$ , 则式(2)可变换为

$$W_{\text{asti}} = \frac{1}{2} W_{222} [(\mathbf{H} - \mathbf{a}_{222})^2 + \mathbf{b}_{222}^2] \cdot \boldsymbol{\rho}^2 \quad (3)$$

易求得像散为 0 时的视场矢量  $\mathbf{H}$  为

$$\mathbf{H} = \mathbf{a}_{222} \pm i\mathbf{b}_{222} \quad (4)$$

式(4)表明,含倾斜偏心旋转对称元件光学系统的像散零点有两个,零点的位置会受倾斜偏心的影响.随着倾斜偏心量的增大,两个像散零点位置会逐渐偏移并离开像面,使整个像面范围内都存在大量像散.因此,通过加入倾斜偏心的旋转对称元件,共形窗口在某一瞬时扫描视场引入的像散有可能被校正;并且随着扫描视场的变化,成像光束在校正元件上的有效区域也发生变化,相当于校正元件的倾斜偏心量改变了,其引入的像散也发生变化,为校正窗口引入的随扫描视场变化而变化的像散提供了可能.由式(1)可知,除球差外,其余单色像差均受倾斜偏心元件影响.为补偿倾斜偏心元件在校正窗口象散的同时引入的其余像差,校正器中需含有两个或两个以上向不同方向偏心或倾斜的元件,使各元件自身引入的矢量彗差等残余像差相互抵消.通过光学软件优化,能得到各校正元件最佳的倾斜偏心量.

通过光学设计软件 Code V 设计和优化含有倾斜偏心旋转对称元件的静态校正器,优化后共形光学系统结构如图 5.

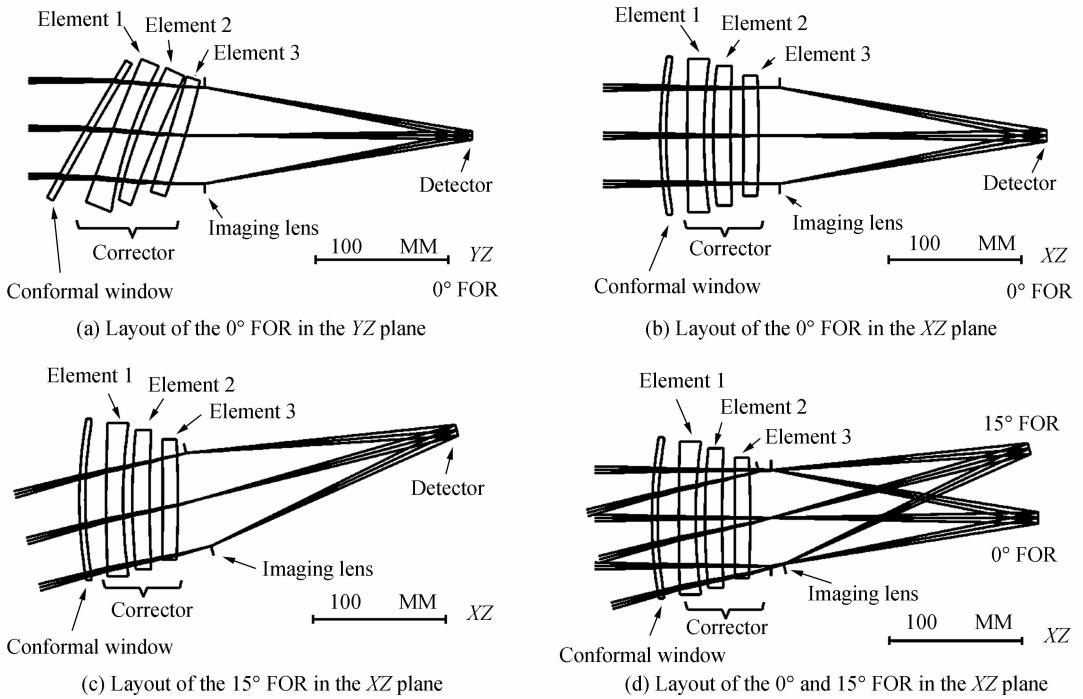


图5 系统结构图  
Fig. 5 System layout

这个静态校正器由三个含有倾斜偏心的旋转对称元件组成,且每个元件的表面面形为偶次非球面.整个静态校正器相对于共形窗口的位置是固定的.窗口外表面至理想透镜的沿轴距离仅为 90 mm,表明校正器

结构较为紧凑.在全扫描视场范围内,使用的窗口口径为 120 mm,小于给定的窗口尺寸.静态校正器的结构参数如表 1,其中每个校正元件的非球面系数如表 2.

表 1 静态校正器的结构参数

Table 1 Configuration parameters of the static corrector

Element	Surface	Surface type	Y radius /mm	Thickness /mm	Material	Tilted angle /( $^{\circ}$ )	Y Decenter /mm
1	Front	Even asphere	1594.928	13	MgF <sub>2</sub>	21.9	20.8
	Back	Even asphere	381.096				
2	Front	Even asphere	528.731	15	MgF <sub>2</sub>	24.8	32.9
	Back	Even asphere	1150.340				
3	Front	Even asphere	-4348.377	12	MgF <sub>2</sub>	17.5	-19.3
	Back	Even asphere	-906.107				

表 2 校正元件的非球面系数

Table 2 Aspheric surface coefficients of the correction elements

Element	Surface	4 <sup>th</sup> order coefficient/ $10^{-9}$	6 <sup>th</sup> order coefficient/ $10^{-13}$
1	Front	-9.320931	3.426360
	Back	6.235289	4.507798
2	Front	13.96865	2.779614
	Back	6.438270	1.560823
3	Front	-11.25785	-26.23661
	Back	-19.23154	-27.47004

选择 MgF<sub>2</sub> 作为校正元件的材料,这种材料的表面可以被单点金刚石车削设备加工成所需的非球面面形<sup>[14]</sup>.在优化过程中,像面始终被放置在理想透镜的焦平面处,在 0°扫描视场位置,单独由共形窗口引入的矢量像散分布如图 6(a);单独由静态校正器引入的矢量像散分布如图 6(b);整个共形光学系统的矢量像散分布如图 6(c).由图 6 可以看出,共形窗口引入的像散与校正器引入的像散恰好可以相互抵消,使整个系统的残余像散量较小,这与理论分析结果相符.

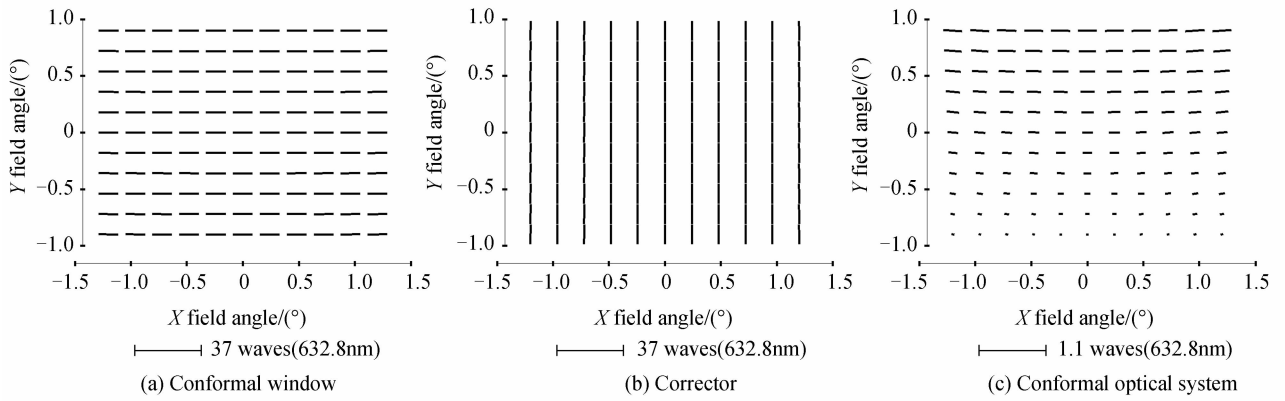


图6 在 $0^\circ$ 扫描视场,引入的像散全视场显示

Fig. 6 Full-Field-Displays (FFDs) for the introduced astigmatism at  $0^\circ$  FOR

图7给出了 $15^\circ$ 扫描视场位置共形窗口、校正器和整个系统的矢量像散分布.由图7可知,随着扫描视场的变化,共形窗口引入的像散与校正器引入的像散同

样能够相互抵消,使得整个系统的残余像散较小,表明校正器能够校正窗口引入的变化像散.

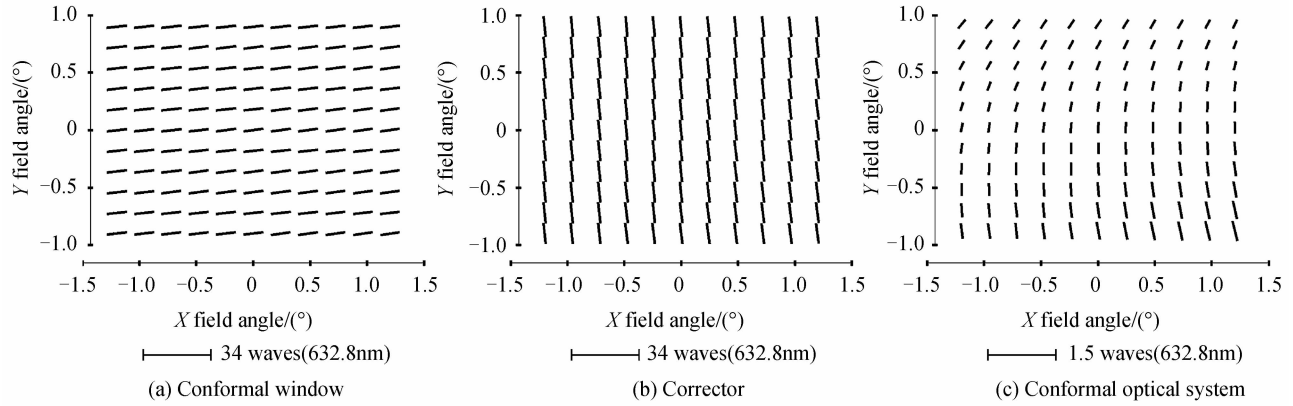


图7 在 $15^\circ$ 扫描视场,引入的像散全视场显示

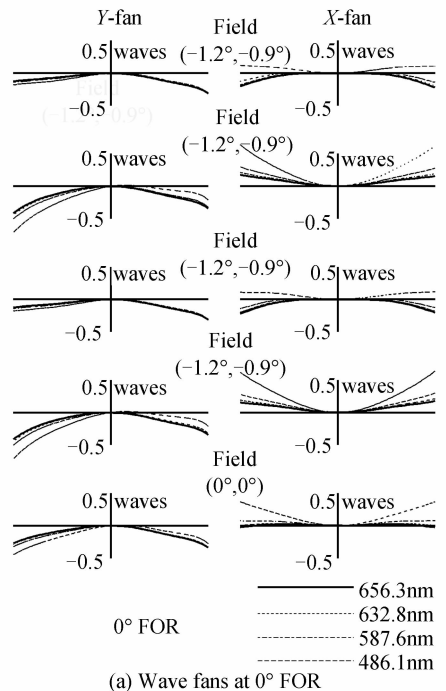
Fig. 7 FFDs for the introduced astigmatism at  $15^\circ$  FOR

## 2.2 设计表现

该共形光学系统的设计目标是将系统在各扫描视场位置的波像差均减小至1个波长以内.加入校正器的共形光学系统的波前图如图8.

在图8中除了给出 $0^\circ$ 视场点波前图外,还给出了四个边缘视场点的波前图.这四个边缘视场点的像差比其余采样视场点更大,它们的归一化坐标分别为 $(1, 1), (1, -1), (-1, 1), (-1, -1)$ .在各扫描视场位置中, $15^\circ$ 扫描视场的残余像差最大,因此在图8中仅给出了具有代表性的 $0^\circ$ 和 $15^\circ$ 扫描视场的波前图.由图8可知,在 $0^\circ$ 扫描视场和 $15^\circ$ 扫描视场,整个共形光学系统在可见光波段引入的波像差均小于1个波长,满足设计要求.

加入校正器后,共形光学系统在 $0^\circ$ 视场角引入的主要 Zernike 像差随扫描视场的变化情况如图9.在各扫描视场位置,主要 Zernike 像差的量值已经趋近于0,表明共形窗口引入的静态像差和动态像差均得到了很好的校正.



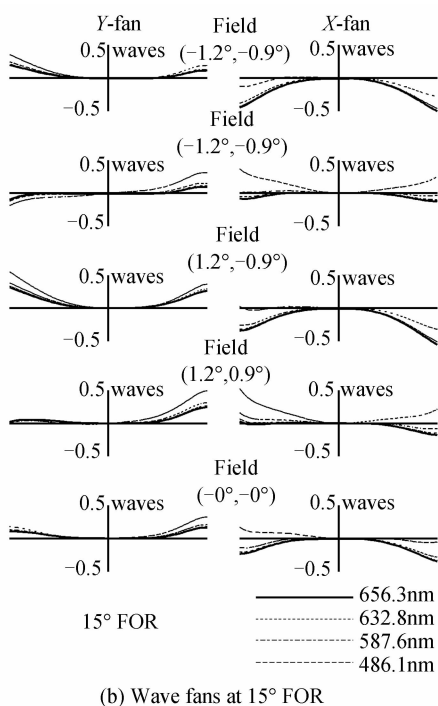


图8 含有校正器的共形光学系统的波前图  
Fig.8 Wave fans of the conformal optical system with the corrector

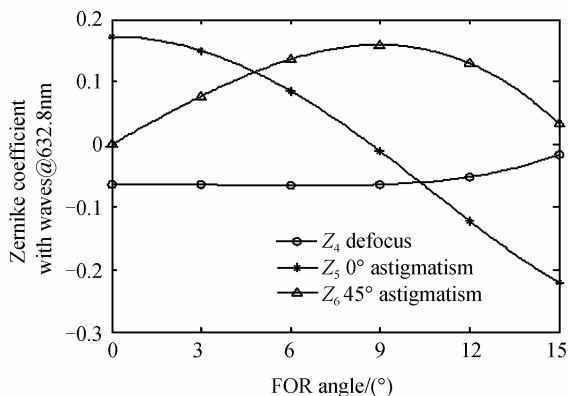


图9 含有校正器的共形光学系统的主要 Zernike 像差  
Fig.9 Predominant Zernike aberration of the conformal optical system with the corrector

加入校正器后,共形光学系统在 $0^\circ$ 和 $15^\circ$ 扫描视场位置的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线如图10(a)和10(b)。由图10可知,在 $0^\circ$ 和 $15^\circ$ 扫描视场位置,共形光学系统在50 lp/mm处MTF值均在0.8以上。在其余扫描视场位置的系统成像质量要好于 $15^\circ$ 扫描视场位置。利用光学设计软件Code V中Distortion Grid功能查看系统的畸变情况,得到共形光学系统在各扫描视场位置的畸变均小于0.18%,几乎可以忽略。

为评估该校正器装调可行性,对校正元件的定位公差进行分析。依据现有装调水平,给定光学元件之间的间隔公差为 $\pm 0.03$  mm,每个校正元件的倾斜公差为 $\pm 1'$ ,偏心公差为 $\pm 0.02$  mm,利用软件Code V对加

入公差后系统MTF在50 lp/mm处下降量进行评价,结果见表3和表4,其中T代表子午,S代表弧矢。由表3和4可知,在 $0^\circ$ 和 $15^\circ$ 扫描视场位置,50 lp/mm处各瞬时视场MTF的最小值为0.751 1,满足像质要求。

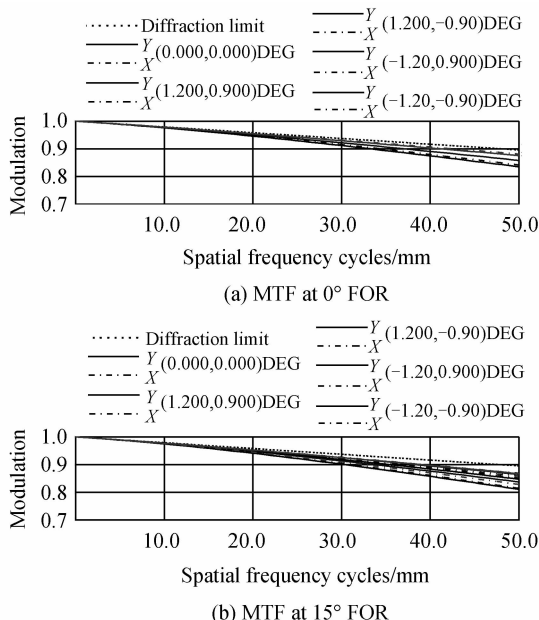


图10 含有校正器的共形光学系统的MTF曲线  
Fig.10 MTF of the conformal optical system with the corrector

表3  $0^\circ$ 扫描视场公差分析结果  
Table 3 Results of tolerance analysis at  $0^\circ$  FOR

Relative field		MTF	MTF+Tolerance
(0,0)	T	0.8634	0.8371
(1,1)	T	0.8383	0.8021
	S	0.8455	0.8083
(1,-1)	T	0.8803	0.8620
	S	0.8859	0.8715
(-1,1)	T	0.8383	0.8049
	S	0.8455	0.8015
(-1,-1)	T	0.8803	0.8630
	S	0.8859	0.8716

表4  $15^\circ$ 扫描视场公差分析结果  
Table 4 Results of tolerance analysis at  $15^\circ$  FOR

Relative field		MTF	MTF+Tolerance
(0,0)	T	0.8684	0.8399
(1,1)	T	0.8407	0.7891
	S	0.8620	0.8252
(1,-1)	T	0.8130	0.7904
	S	0.8180	0.7511
(-1,1)	T	0.8491	0.8048
	S	0.8544	0.8148
(-1,-1)	T	0.8715	0.8557
	S	0.8308	0.7761

### 3 结论

本文设计了一种用于校正飞机共形窗口像差的静

态校正器结构,该校正器由三个含有倾斜和偏心的旋转对称元件组成且每个元件的表面面形为偶次非球面.校正器相对于共形窗口的位置固定,且结构紧凑稳定,而且相比于复杂面形,校正元件表面的旋转对称面形更有利于加工.实验表明,该校正器能够有效地校正飞机共形窗口引入的静态和动态像差,为飞机共形窗口静态校正技术提供参考.

#### 参考文献

- [1] TROTTO P A. Precision conformal optics technology program [C]. SPIE, 2001, **4375**: 96~107.
- [2] MARUSHIN P H, SASIAN J M, LIN T Y, *et al.* Demonstration of a conformal window imaging system: design, fabrication, and testing[C]. SPIE, 2001, **4375**: 154-159.
- [3] SPARROLD S W. Arch corrector for conformal optical systems[C]. SPIE, 1999, **3705**: 189-200.
- [4] SPARROLD S W, KNAPP D J, MANHART P H, *et al.* Capabilities of an arch element for correcting conformal optical domes[C]. SPIE, 1999, **3779**: 434-444.
- [5] LI Dong-xi, LU Zhen-wu, SUN Qiang, *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.
- [6] LI Dong-xi, LU Zhen-wu, SUN Qiang, *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.
- [7] SUN Jin-xia, LIU Jian-zhuo, SUN Qiang, *et al.* Application of the aberration correction criteria in conformal optical system design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 223-226.  
孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 消像差条件在共形光学系统中的应用[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 223-226.
- [8] SUN Jin-xia, SUN Qiang, LI Dong-xi, *et al.* Conformal dome aberration correction with diffractive elements [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 3900-3905.  
孙金霞, 孙强, 李东熙, 等. 利用衍射光学元件进行共形整流罩像差校正的研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7): 3900-3905.
- [9] JIANG Yang, SUN Qiang, LIU Ying, *et al.* Athermal design for IR optical seeker system with wide FOV [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 462-466.  
姜洋, 孙强, 刘英, 等. 大视场红外导引头光学系统消热差设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 462-466.
- [10] ZHANG Wang, ZUO Bao-jun, CHEN Shou-qian, *et al.* Design of fixed correctors used in conformal optical system based on diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(3): 461-466.
- [11] QU He-meng, ZHANG Xin, WANG Ling-jie. Design of elliptical window optical system based on fixed corrector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1022003.  
曲贺盟, 张新, 王灵杰. 基于固定校正元件的椭球形窗口光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1022003.
- [12] HUANG Ying-qing, ZHAO Zhe, JIANG Xiao-yu, *et al.* Target indication based on optical phased array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0409001.  
黄应清, 赵哲, 蒋晓瑜, 等. 基于光学相控阵的目标指示系统[J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 0409001.
- [13] THOMPSON K P. Aberration fields in tilted and decentered optical systems [D]. Arizona: University of Arizona, 1980, 23-56.
- [14] SCHAEFER J P, EICHHOLTZ R A, SULZBACH F, *et al.* Fabrication challenges associated with conformal optics [C]. SPIE, 2001, **4375**: 128-137.