

# 基于自由曲面校正器的机身共形光学系统设计

赵春竹 崔庆丰 赵渊明 赵丽东 朴明旭

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 现有扫描式机身共形光学系统均使用了动态校正器,但动态校正器的使用会造成光学系统稳定性差且光机结构复杂。为提高机身共形光学系统在实际应用中的稳定性,简化光机结构,提出了一种基于自由曲面校正器的机身共形光学系统静态校正方法。基于飞机应用,利用该校正方法设计了一个瞬时视场为 $3^\circ$ 、全扫描视场为 $30^\circ$ 的机身共形光学系统。设计结果表明:通过在倾斜的共形窗口后面加入两个倾斜的静态自由曲面校正器,可使共形窗口引入的静态像差和动态像差均得到校正,整个共形光学系统在各扫描视场位置的成像质量均接近衍射极限。同时,相比于动态校正器,静态自由曲面校正器的使用提升了该系统的稳定性,简化了系统的光机结构。

**关键词** 光学设计; 共形窗口; 像差校正; 自由曲面; 成像系统

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1022010

## Design of Fuselage Conformal Optical System Based on Freeform Correctors

Zhao Chunzhu Cui Qingfeng Zhao Yuanming Zhao Lidong Piao Mingxu

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

**Abstract** Existing scanning fuselage conformal optical systems all contain dynamic correctors. However, the stability of the optical system with dynamic corrector is poor and the structure is complex. To improve the stability of fuselage conformal optical systems for application and simplify the system structure, a static correction method used in fuselage conformal optical system which is based on freeform correctors is proposed. Based on aircraft applications, a conformal optical system with  $3^\circ$  field of view and  $30^\circ$  field of regard is designed by the method. The design results show that by adding two tilted freeform correctors behind the tilted conformal window, the static aberration and dynamic aberration introduced by the conformal window are corrected and the image quality of the conformal optical system is near the diffraction limit at every field of regard. Moreover, compared with dynamic correctors, the static freeform correctors enhance the stability of the optical system and simplify the system structure.

**Key words** optical design; conformal window; aberration correction; freeform surface; imaging system

**OCIS Codes** 220.1000; 220.1250; 220.2740

## 1 引言

为了保证飞机上的光电系统正常工作,需要在机身适当位置安装透光窗口。窗口将光电系统与外界环境隔离,并且可以使光电系统工作波段的辐射透过窗口传输。在过去很长一个时期,这种窗口的形状都是容易加工的平面或球面<sup>[1-2]</sup>。但平面或球面窗口并不符合飞机外形轮廓的空气动力学要求。共形窗口是一种特殊的窗口,它的外形与机身外形轮廓相匹配。相比于平面或球面窗口,共形窗口更符合飞机设计的空

收稿日期: 2015-04-07; 收到修改稿日期: 2015-06-30

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)

作者简介: 赵春竹(1988—),男,博士研究生,主要从事光学设计和共形光学方面的研究。E-mail: cz\_zhao@sina.cn

导师简介: 崔庆丰(1954—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学设计和衍射光学等方面的研究。

E-mail: qf\_cui@163.com(通信联系人)

气动力学要求,因此使用共形窗口将提高飞机的整体性能<sup>[1]</sup>。

一个优选的机身共形窗口外形是双曲率面形<sup>[1]</sup>。由于共形窗口外形是非对称的,并且常常相对于其后的成像系统倾斜放置,因此共形窗口引入了大量的静态非对称像差。同时为了满足大视场的应用要求,飞机上的成像系统需要相对于共形窗口旋转来扫描视场,因此,共形窗口不仅引入了静态像差,还引入了随扫描视场变化而变化的动态像差,其中动态像差的校正是尤为困难的。为了校正机身共形窗口引入的静态和动态像差,需要在窗口后成像系统中加入校正器。目前,扫描式机身共形光学系统均使用了动态校正器<sup>[1,3-4]</sup>。动态校正器由两个或更多光学元件组成,这些光学元件中至少含有两个非对称的柱面元件,用以校正窗口引入的静态非对称像差,同时各元件通过平移或旋转运动产生可变的像差来补偿窗口引入的动态像差。例如,作为美国精密共形光学技术项目<sup>[9]</sup>的成果证明之一,亚利桑那大学光学科学中心研制了一个机身共形光学系统<sup>[1]</sup>。在系统中使用了由一对柱面镜组成的动态校正器。这对柱面镜与其后的成像系统连接在一起,共同在共形窗口后面做旋转运动。在 $0^\circ$ 瞬时扫描视场位置,这对柱面镜校正了窗口引入的静态像差。随着旋转扫描角度的变化,这对柱面镜做相对平移运动,校正了窗口在不同扫描视场位置引入的动态像差。为了实现动态校正器的功能,系统使用了二维运动平台,旋转和平移运动同时进行,使得光机结构较复杂,系统重量和体积较大且需要较高的光机电精度。因此,含有动态校正器的光学系统存在的主要问题是光机结构复杂且在实际应用中稳定性不好<sup>[6-7]</sup>。

静态校正器是静态的光学校正元件。因为无需移动且不随窗口后成像系统旋转而旋转,所以含有静态校正器的光学系统稳定性高且光机结构简单,更适用于实际应用<sup>[7]</sup>。例如,在椭球形共形导弹整流罩的像差校正技术中,已有多种静态校正技术被研究<sup>[6-12]</sup>。但机身共形窗口形状非对称且倾斜放置,用于校正旋转对称共形整流罩像差的静态校正器并不适用于校正机身共形窗口的像差。本文提出了一种基于自由曲面校正器的机身共形光学系统静态校正方法。利用该校正方法设计了一个扫描式机身共形光学系统。通过在倾斜的共形窗口后面加入两个倾斜的静态自由曲面校正器,使机身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。

## 2 机身共形光学系统建模及像差分析

### 2.1 机身共形光学系统建模

选取亚利桑那大学光学科学中心研制的机身共形光学系统的相关设计参数作为所设计的机身共形光学系统的各项参数<sup>[1]</sup>。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机身共形光学系统如图1所示。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,由于在实际应用中系统还要满足激光探测<sup>[13-16]</sup>的要求,激光波长为632.8 nm,因此选择激光波长632.8 nm作为系统的

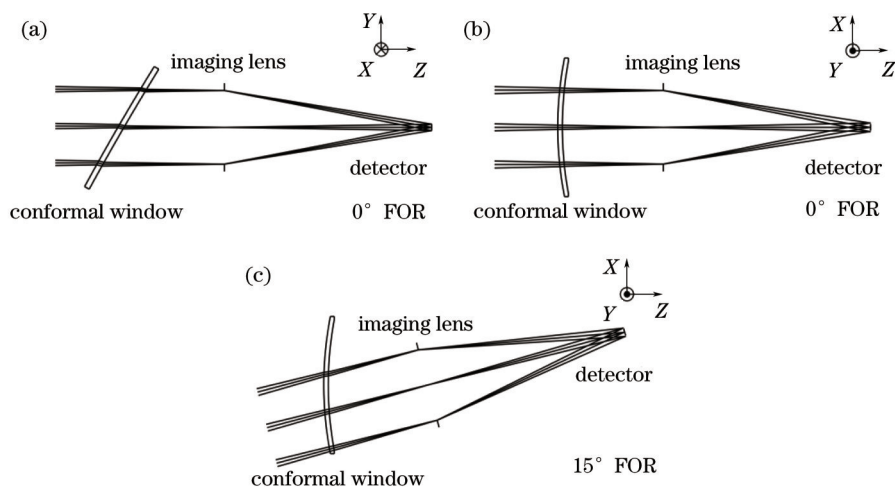


图1 系统结构图。(a)  $0^\circ$ 扫描视场YZ平面内的结构图;(b)  $0^\circ$ 扫描视场XZ平面内的结构图;(c)  $15^\circ$ 扫描视场XZ平面内的结构图  
Fig.1 System layout. (a) Layout of  $0^\circ$  FOR in YZ plane; (b) layout of  $0^\circ$  FOR in XZ plane; (c) layout of  $15^\circ$  FOR in XZ plane

设计波长。在设计优化过程中,采样的波长包括486.1、587.6、632.8、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2/3 inch (1 inch=2.54 cm)CCD,放置在理想透镜的近轴焦点处。在YZ平面内,共形窗口相对其后成像系统倾斜30°;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(FOR)范围为30°。由于共形窗口关于YZ平面对称,因此只需考虑0°~15°的扫描视场位置。对于任一非零瞬时扫描视场位置,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要求,在优化过程中选择了25个采样视场点,视场点类型为物方视场角。这些选取的视场点位置用归一化视场坐标表示在图2中的黑点处。

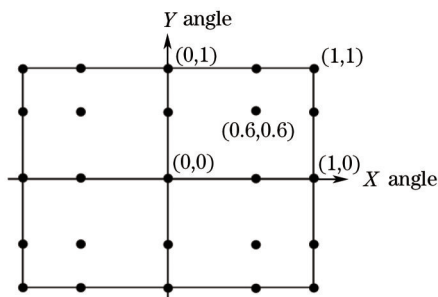


图2 归一化的采样视场点坐标

Fig.2 Normalized coordinates of sampled field points

### 2.2 机身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所示。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°视场角引入的波像差情况。由图3可知,在0°瞬时扫描视场,共形窗口引入了大约23个波长的像散;在15°瞬时扫描视场,共形窗口引入了大约20个波长的像散。

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。条纹Zernike多项式前9项与它们对应的初级像差见表1。图4为共形窗口在0°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°扫描视场处,共形窗口引入的主要像差是 $Z_5$ 像散和 $Z_4$ 离焦,而不引入 $Z_6$ 像散。随着扫描视场的增大,共形窗口引入的 $Z_5$ 像散和 $Z_4$ 离焦逐渐减小,但 $Z_6$ 像散的量值却逐渐增大。

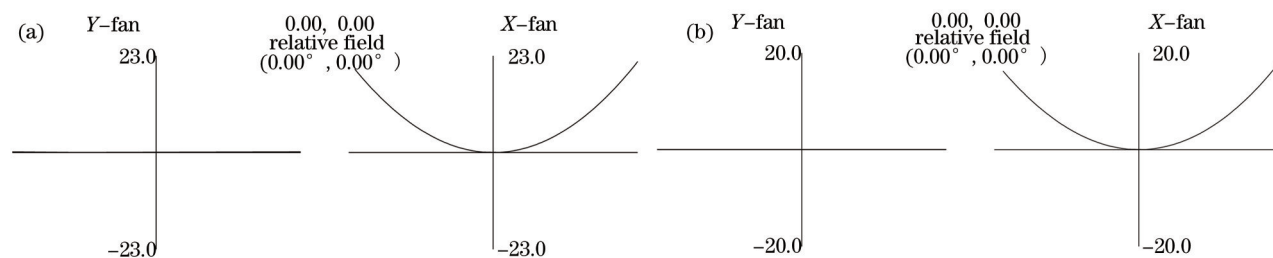


图3 (a) 0°扫描视场波前图; (b) 15°扫描视场波前图

Fig.3 (a) Wavefront at 0° FOR; (b) wavefront at 15° FOR

表1 条纹Zernike多项式前9项

Table 1 First nine terms of fringe Zernike polynomial expansion

Term	Zernike polynomial	Name
$Z_1$	1	Piston
$Z_2$	$R\cos\theta$	X-tilt
$Z_3$	$R\sin\theta$	Y-tilt
$Z_4$	$2R^2-1$	Defocus
$Z_5$	$R^2\cos 2\theta$	0° astigmatism
$Z_6$	$R^2\sin 2\theta$	45° astigmatism
$Z_7$	$(3R^3-2R)\cos\theta$	X-coma
$Z_8$	$(3R^3-2R)\sin\theta$	Y-coma
$Z_9$	$6R^4-6R^2+1$	Spherical

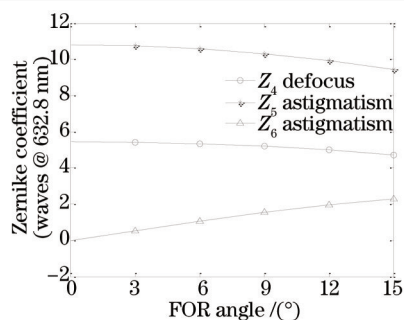


图4 共形窗口引入的主要Zernike像差

Fig.4 Predominant Zernike aberrations introduced by the conformal window

### 3 基于自由曲面校正器的像差校正

#### 3.1 设计策略及优化方法

研究目的是设计一种能够校正机身共形窗口静态和动态像差的静态校正器。由于共形窗口后面的成像是旋转对称的,其产生的像差并不能补偿窗口引入的非对称像差,并且实际成像系统本身的像差已经造成了成像质量的下降,为了在实际应用中使整个共形光学系统的像质仍能达到设计指标要求,使用的静态校正器需要有足够的像差校正能力校正共形窗口引入的全部静态和动态像差。由于机身共形窗口形状非对称,常规旋转对称面形静态校正器已无法很好的校正其引入的静态和动态像差;亚利桑那大学使用一对非对称的柱面镜仍然需要通过柱面镜间相对平移运动来校正窗口引入的动态像差,这表明简单非对称面形静态校正器即使能校正窗口在某一瞬时扫描视场引入的静态像差,也很难校正窗口引入的动态像差。因此,采用具有丰富像差校正自由度<sup>[17-19]</sup>的自由曲面面形设计静态校正器。在光学设计软件 Code V 或 Zemax 中,能够描述自由曲面的多项式面形包括 XY 多项式面形和 Zernike 多项式面形。这里使用条纹 Zernike 多项式面形描述自由曲面。条纹 Zernike 多项式面形的表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^{37} C_j Z_j, \quad (1)$$

式中  $z$  为表面矢高,  $c$  为顶点曲率,  $k$  为圆锥系数,  $r$  为径向半径,  $Z_j$  是第  $j$  个条纹 Zernike 多项式,  $C_j$  是  $Z_j$  的系数。每一个条纹 Zernike 多项式用归一化极坐标  $R$  和  $\theta$  表示,其中  $R=r/R_{nom}$ ,  $R_{nom}$  为归一化半径。前 9 个条纹 Zernike 多项式的表达式见表 1。在前 9 个条纹 Zernike 多项式中,  $Z_1$  是常数,  $Z_4$  和  $Z_9$  项引入的矢高是旋转对称的,其余 Zernike 项引入的矢高都是非旋转对称的。以  $Z_5$  条纹的 Zernike 项为例,图 5(a) 为  $Z_5$  条纹的 Zernike 项引入的边缘矢高为 1 mm 的面形矢高图,其形状为鞍形,代表像散。当一束光照射到该表面,在表面上的光线轨迹如图 5(a) 中虚线所示。虚线所圈范围的矢高如图 5(b) 所示。去掉图 5(b) 中面形矢高的常数和倾斜分量后得到的矢高如图 5(c) 所示,矢高的形状仍为鞍形,会在光路中引入像散。由于任意一个条纹 Zernike 项引入的矢高形状都不相同,因此条纹 Zernike 多项式面形具有丰富的像差校正自由度,其引入的非对称矢高

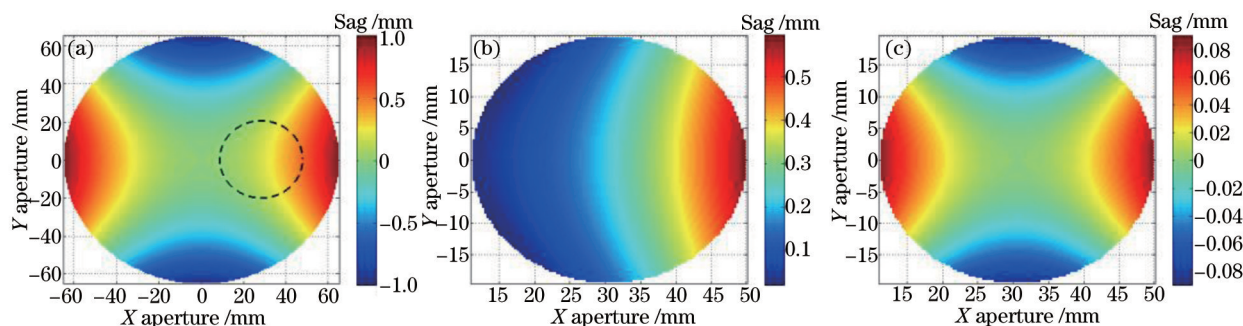


图5 面形矢高图。(a) 由  $Z_5$  条纹 Zernike 项引入的面形矢高图; (b) 图 5(a) 中虚线区域的矢高图;

(c) 去掉图 5(b) 中常数和倾斜分量后呈现的矢高图

Fig.5 Surface sag. (a) Surface sag introduced by  $Z_5$  Zernike term; (b) sag of area encircled dotted line in (a);

(c) sag in (b) with constant and tilt removed



能够很好地校正非对称像差。同时,随着扫描视场的变化,成像光束照射到面形上的有效区域矢高形状也会不同,使得动态像差的校正成为可能。

利用条纹Zernike多项式面形设计静态校正器。将近轴曲率作为优化的起点,再逐渐增加低级次的条纹Zernike项进行优化,然后逐渐增加更高次的条纹Zernike项进行优化。由于共形窗口关于YZ平面对称,为了不增加设计的复杂程度,在选取校正器表面面形的Zernike项时,仅选取矢高关于YZ平面对称的Zernike项进行优化。由于某些Zernike项会改变表面的位置和倾斜,因此在优化过程中,需要对校正器每个表面的位置和表面倾斜进行限制,使表面位置保持不变,且表面无倾斜,尽量不增加校正器的复杂程度。由于共形窗口在YZ平面内有倾斜,为了更好地校正窗口引入的像差,将校正器在YZ平面内的倾斜也设为变量进行优化。除了将校正器的表面面形参数及倾斜作为优化自由度外,将窗口与校正器之间可优化的间隔也设为变量进行优化。

### 3.2 设计结果

加入一个自由曲面校正器进行优化后,仍有部分像差未能校正。最终使用了两个自由曲面校正器,优化后的系统结构图如图6所示。图6中共形窗口后面第一个校正器通光口径为120 mm,厚度为12 mm,在YZ平面内倾斜26.4°;共形窗口后面第二个校正器通光口径为97 mm,厚度为10 mm,在YZ平面内倾斜29.3°。这两个校正器的材料均为氟化镁(MgF<sub>2</sub>)且每个表面均为关于YZ平面对称的自由曲面。氟化镁是常用的共形窗口和校正元件材料,其表面能够被单点金刚石加工设备加工成非旋转对称的自由曲面<sup>[20]</sup>。而且氟化镁的折射率低,其表面面形误差造成的像质下降要比高折射率材料小很多,这是没有选取高折射率材料作为校正器的主要原因。加入校正器后,共形光学系统在0°视场角引入的主要Zernike像差随扫描视场的变化情况如图7所示。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。加入校正器的共形光学系统的波前图如图8所示。在图8中除了给出0°视场点波前图外,还给出了4个边缘视场点的波前图。这4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°扫描视场的残余像差

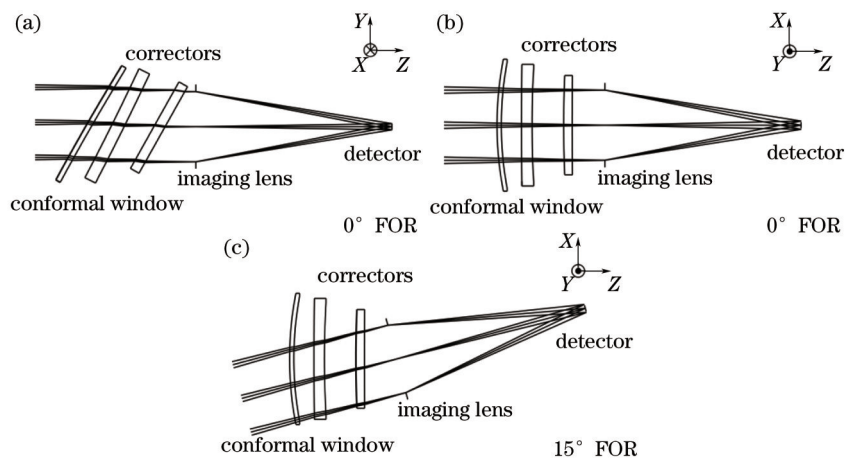


图6 系统结构图。(a) 0°扫描视场YZ平面内的结构图;(b) 0°扫描视场XZ平面内的结构图;(c) 15°扫描视场XZ平面内的结构图

Fig.6 System layout. (a) Layout of the 0° FOR in the YZ plane; (b) layout of 0° FOR in XZ plane; (c) layout of 15° FOR in XZ plane

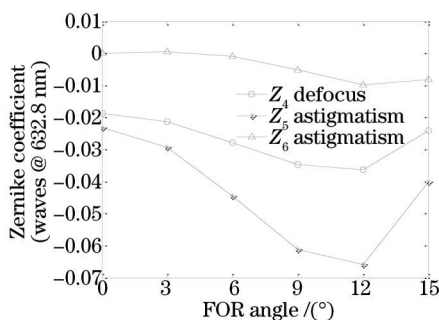


图7 优化后共形光学系统引入的主要Zernike像差

Fig.7 Predominant Zernike aberration introduced by conformational optical system after optimization

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,共形光学系统在4个采样波长486.1、587.6、632.8、656.3 nm的波像差均小于0.5个波长。图9为加入校正器的共形光学系统在 $0^\circ$ 、 $8^\circ$ 和 $15^\circ$ 瞬时扫描视场位置的复色调制传递函数(MTF)曲线。由图9可知,共形光学系统的像质已经接近衍射极限。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0.16%,几乎可以忽略。

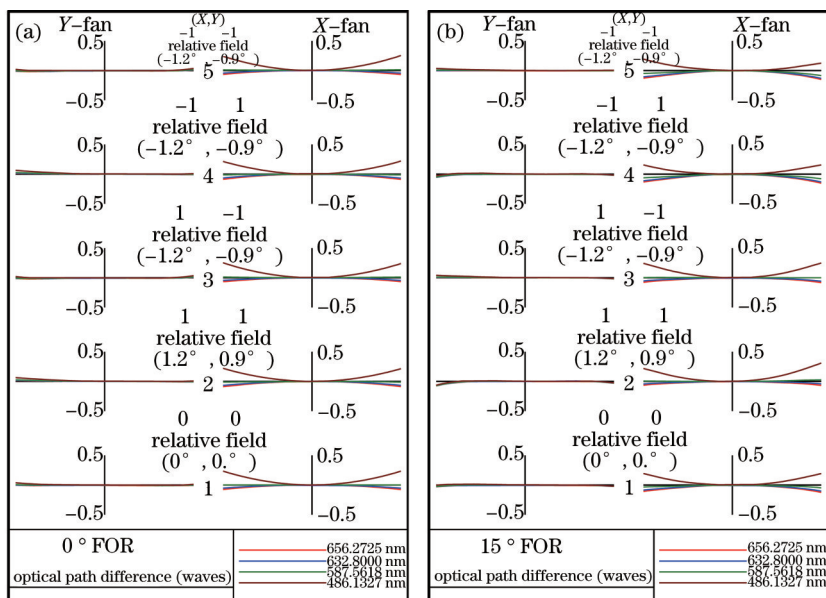


图8 含有校正器的共形光学系统的波前图。(a)  $0^\circ$ 扫描视场;(b)  $15^\circ$ 扫描视场

Fig.8 Wavefront of conformal optical system with corrector for (a)  $0^\circ$  FOR; (b)  $15^\circ$  FOR

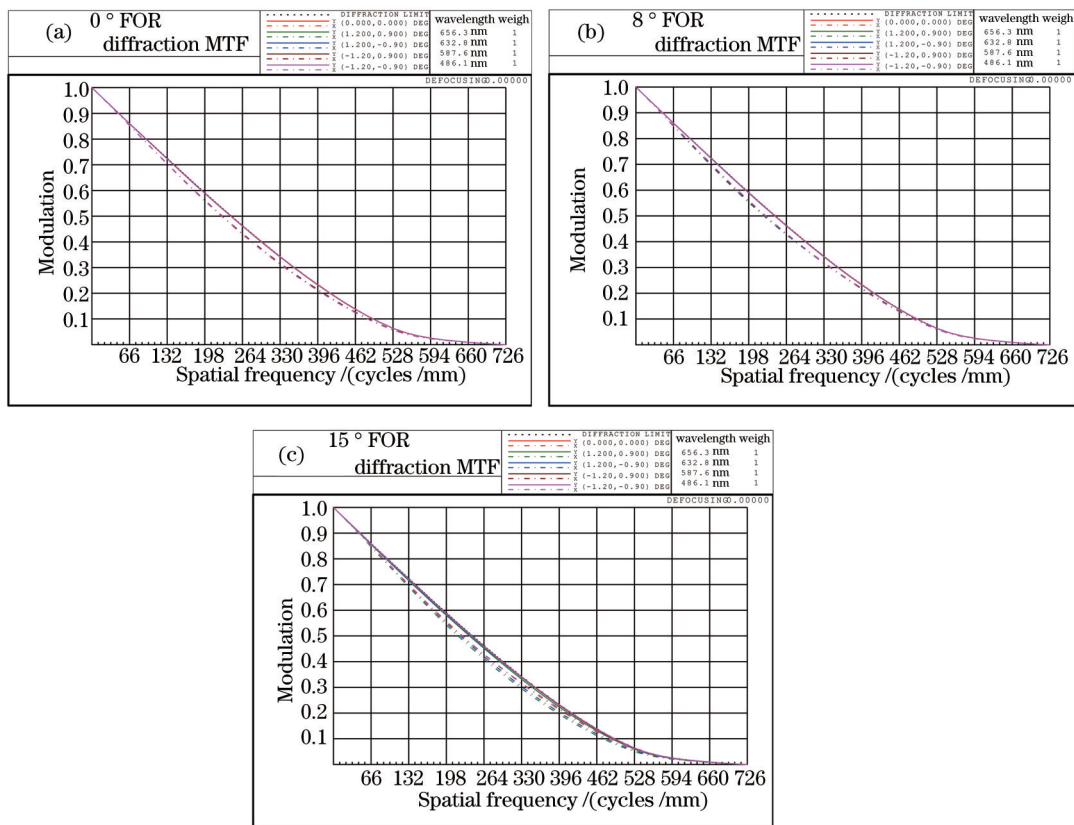


图9 优化后共形光学系统的MTF曲线。(a)  $0^\circ$ 扫描视场;(b)  $8^\circ$ 扫描视场;(c)  $15^\circ$ 扫描视场

Fig.9 MTF of conformal optical system after optimization. (a)  $0^\circ$  FOR; (b)  $8^\circ$  FOR; (c)  $15^\circ$  FOR

将共形窗口后第一个校正器的前表面至第二个校正器的后表面分别编号为表面1至表面4,这两个自由曲面校正器的面形参数被列在表2中。表2中近轴曲率 $c$ 的单位为 $\text{mm}^{-1}$ ,归一化半径 $R_{\text{norm}}$ 的单位为 $\text{mm}$ 。校正器各表面的面形矢高图如图10所示。

表2 自由曲面校正器的面形参数

Table 2 Surface parameters of freeform correctors

Symbol	Value (Surface 1)	Value (Surface 2)	Value (Surface 3)	Value (Surface 4)
$c$	$-5.9217 \times 10^{-4}$	$1.404 \times 10^{-4}$	$8.3554 \times 10^{-4}$	$2.1268 \times 10^{-4}$
$C_1$	0.65265621	0.30351636	-0.41187726	-0.14549300
$C_3$	0.04898104	-0.019072756	-0.06978438	-0.02447943
$C_4$	0.68123357	0.34074752	-0.40380877	-0.14524791
$C_5$	0.73231261	1.75001076	1.11332669	0.21183088
$C_8$	0.02449052	-0.00953638	-0.03489219	-0.01223971
$C_9$	0.02681611	0.03568556	0.009595569	0.00155282
$C_{11}$	0.00074916	-0.09854382	-0.15224308	-0.08738545
$C_{12}$	0.00584428	0.01243085	0.01685675	0.01082902
$C_{16}$	-0.00176124	-0.00154559	0.00152707	0.00130773
$C_{17}$	-0.04058617	-0.06568946	-0.08601129	-0.06271809
$R_{\text{norm}}$	70	70	70	70

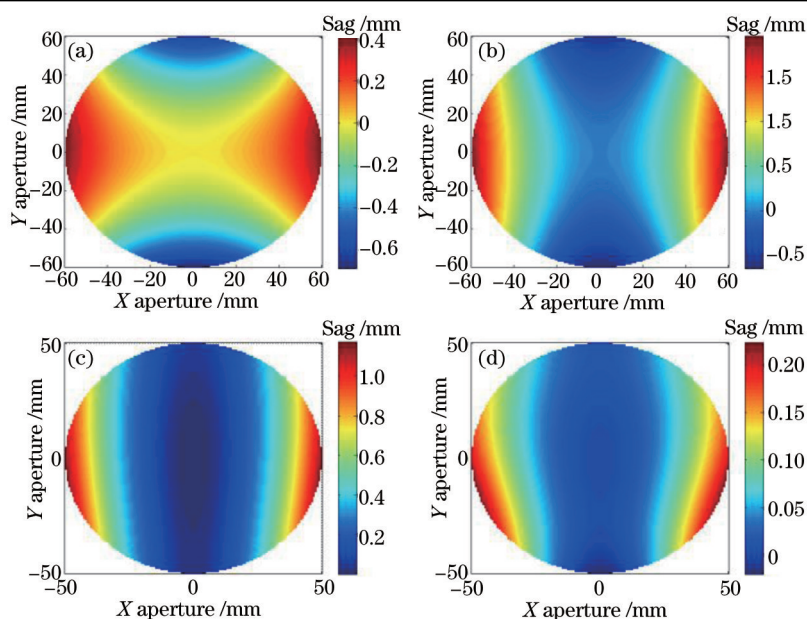


图10 校正器各表面的面形矢高图。(a)表面1;(b)表面2;(c)表面3;(d)表面4

Fig.10 Sag of each surface in the correctors. (a) Surface 1; (b) surface 2; (c) surface 3; (d) surface 4

### 3.3 公差分析

对3.2节中设计的自由曲面校正器进行公差分析,评估其对加工和装调公差敏感程度。依据现有加工和装调水平,给定公差数据如表3所示,测试波长为632.8 nm。通过Code V光学设计软件公差分析功能,对加入公差后系统MTF在50 lp/mm的下降量进行评价,公差分析结果分别见表4和表5,其中 $T$ 代表子午, $S$ 代表弧矢。公差分析中使用了离焦补偿,且设置每个瞬时扫描视场位置离焦补偿量相同。由表4和表5可知,在 $0^\circ$ 瞬时扫描视场位置,加入公差后各视场MTF在50 lp/mm处均大于0.849,最大下降量为0.0468;在 $15^\circ$ 瞬时扫描视场位置,加入公差后各视场MTF在50 lp/mm处均大于0.828,最大下降量为0.0626,满足设计要求。

表3 公差数据

Table 3 Tolerance data

Tolerance	Value
Element thickness /mm	±0.03
Air thickness /mm	±0.05
Element wedge /(')	±1
Element decenter /mm	±0.02
Element tilt /(')	±1
Peak to valley surface error /μm	0.2
Index /mm	±0.0003
V-number /%	±0.8

表4 0°瞬时扫描视场公差分析结果

Table 4 Results of tolerance analysis at 0° FOR

Relative field		Design MTF	Design MTF+tolerance
(0,0)	T	0.9018	0.8556
(1,1)	T	0.9014	0.8546
	S	0.8959	0.8503
(1,-1)	T	0.9012	0.8555
	S	0.8953	0.8499
(-1,1)	T	0.9014	0.8546
	S	0.8959	0.8501
(-1,-1)	T	0.9012	0.8555
	S	0.8953	0.8498

表5 15°瞬时扫描视场公差分析结果

Table 5 Results of tolerance analysis at 15° FOR

Relative field		Design MTF	Design MTF+tolerance
(0,0)	T	0.9009	0.8524
(1,1)	T	0.8981	0.8474
	S	0.8911	0.8285
(1,-1)	T	0.8999	0.8515
	S	0.8932	0.8357
(-1,1)	T	0.8991	0.8504
	S	0.8937	0.8393
(-1,-1)	T	0.9010	0.8534
	S	0.8949	0.8421

对于该校正器的制造,关键是自由曲面的加工和检测。在加工方面,校正器材料氟化镁(MgF<sub>2</sub>)是一种很适合用单点金刚石车削的材料<sup>[20]</sup>;采用超精密五轴单点金刚石加工设备可以在氟化镁表面加工出复杂的光学自由曲面面形,且不需要抛光等后续加工工序就可以使加工的面形精度达亚微米量级,表面粗糙度达纳米量级<sup>[21]</sup>,能够满足表3给定的0.2 μm的表面面形精度要求。并且两个校正器的有效口径并不大,均在100 mm左右;由图10可以看出校正器各表面自由曲面面形在有效口径范围内矢高较小且表面面形梯度变化较小,有利于加工出所要求的面形精度。在检测方面,目前较为成熟的光学自由曲面检测手段是使用高精密光学轮廓仪,其检测精度高,能够满足亚微米量级自由曲面面形误差的检测,可以作为上述自由曲面面形的测量手段。同时,由图10可知,校正器各自由曲面面形梯度变化较小,使得几种已证明能够测量光学自由曲面的高精检测手段(检测精度在几十纳米量级)可以考虑应用于上述自由曲面的检测,如计算全息法<sup>[22]</sup>和哈特曼波前探测法<sup>[23]</sup>;纳米级检测精度的倾斜波面干涉法有望成为一种高精密的光学自由曲面检测手段<sup>[24]</sup>,用于上述自由曲面面形的检测;目前国防、航天、航空等领域对自由曲面光学元件的需求迫切,促使光学自由曲面的加工和检测技术不断取得新的突破,这也将有利于所设计校正器的制造。



## 4 结 论

针对现有技术中动态校正器导致系统稳定性差且光机结构复杂的缺点,提出了基于自由曲面校正器的机身共形光学系统静态校正方法。并依据该方法设计了一个扫描式机身共形光学系统。通过在共形窗口后加入两个倾斜的自由曲面校正器,使共形窗口引入的静态和动态像差均得到很好的校正。相比于动态校正器,这两个自由曲面校正器是静态的,无需移动也不随窗口后成像系统旋转而旋转,因此提升了该系统的稳定性,简化了系统的光机结构。公差分析为校正器的制造提供了参考。

## 参 考 文 献

- 1 P H Marushin, J M Sasian, T Y Lin, *et al.*. Demonstration of a conformal window imaging system: design, fabrication, and testing[C]. SPIE, 2001, 4375: 154–159.
- 2 James P Mills. Conformal optics: theory and practice[C]. SPIE, 2001, 4442: 101–107.
- 3 Joseph M Kunick, Chungte W Chen, Lacy G Cook, *et al.*. Dynamic Aberration Corrector for Conformal Windows: US, 5526181[P]. 1996–06–11.
- 4 Darcy J Morgan, Lacy Cook. Conformal Window Design with Static and Dynamic Aberration Correction: US, 6018424[P]. 2000–01–25.
- 5 Patrick A Trotta. Precision conformal optics technology program[C]. SPIE, 2001, 4375: 96–107.
- 6 Scott W. Sparrold. Arch corrector for conformal optical systems[C]. SPIE, 1999, 3705: 189–200.
- 7 Wang Zhang, Baojun Zuo, Shouqian Chen, *et al.*. Design of fixed correctors used in conformal optical system based on diffractive optical elements[J]. Appl Opt, 2013, 52(3): 461–466.
- 8 Li Dongxi, Lu Zhenwu, 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.
- 9 Li Yan, Li Lin, Huang Yifan, *et al.*. Conformal optical design with combination of static and dynamic aberration corrections[J]. Chin Phys B, 2009, 18(2): 565–570.
- 10 Chang Jun, He Wubin, Wang Ruirui, *et al.*. Optical system design with conformal decentered and tilted elements[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(3): 032201.
- 11 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie. 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圆形窗口光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022003.
- 12 Zhang Yu, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Design of staring conformal optical system based on fixed corrector[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122004.  
张 羽, 崔庆丰, 朱 浩. 基于固定校正元件的凝视型共形光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122004.
- 13 Yang Yujie, Tian Qingguo, Ge Baozhen. Correction technique for joint error of multi-sensor point cloud[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0314002.  
杨玉杰, 田庆国, 葛宝臻. 多传感器点云拼接误差的修正方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0314002.
- 14 Wang Jianjun, Liu Jidong. Analysis and sorting of impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser point cloud obtained from airborne laser scanning[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0414001.  
王建军, 刘吉东. 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素分析及其影响大小排序[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0414001.
- 15 Wang Ling, Zhu Hailong, Tu Pei, *et al.*. High-speed three-dimensional swept source optical coherence tomography system based on LabVIEW[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0704001.  
王 玲, 朱海龙, 涂 沛, 等. 基于 LabVIEW 的高速三维扫频光学相干层析成像系统[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0704001.
- 16 Wang Canjin, Sun Tao, Chen Juan. Image restoration in laser active imaging based on directional filters[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802011.  
王灿进, 孙 涛, 陈 娟. 基于方向滤波器组的激光主动成像图像复原[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802011.
- 17 Cheng Dewen, Wang Yongtian, Hua Hong, *et al.*. Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling [J]. Opt Lett, 2011, 36(11): 2098–2100.
- 18 Li Hua, Zhang Xin, Wang Chao, *et al.*. Optical design of an avionic helmet-mounted displays using freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322001.

- 李 华, 张 新, 王 超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322001.
- 19 Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722001.
- 巩 盾, 王 红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.
- 20 John Schaefer, Richard A Eichholtz, Frank Sulzbach, *et al.*. Fabrication challenges associated with conformal optics[C]. SPIE, 2001, 4375: 128-137.
- 21 Li Rongbin, Zhang Zhihui, Du Xue, *et al.*. Ultra-precision machining technology of freeform optics and its applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 110-115.
- 李荣彬, 张志辉, 杜 雪, 等. 自由曲面光学的超精密加工技术及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 110-115.
- 22 Su Ping, Ma Jianshe, Tan Qiaofeng, *et al.*. Computer generated hologram null test of a freeform optical surface with rectangular aperture [J]. Optical Engineering, 2012, 51(2): 025801.
- 23 Guo Wenjiang, Zhao Liping, Tong Chin Shi, *et al.*. Adaptive centroid-finding algorithm for freeform surface measurements[J]. Appl Opt, 2013, 52(10): D75-83.
- 24 Shen Hua. Research on Key Techniques of Tilted-Wave-Interferometer Used in the Measurement of Freeform Surfaces[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- 沈 华. 基于多重倾斜波面的光学自由曲面非零位干涉测量关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

栏目编辑: 韩 峰