

# 飞机共形窗口像差的二级静态校正

赵春竹 崔庆丰 朴明旭 赵丽东

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 由于飞机共形窗口形状非对称且常常相对于其后成像系统倾斜,使得结构最为简单的旋转对称固定校正器无法应用于飞机共形窗口的像差校正。为了最大程度简化飞机共形校正系统结构,提出了飞机共形窗口像差的二级静态校正,使得固定校正器能够应用于飞机共形窗口的像差校正。第一级静态校正,即通过某种静态校正手段首先校正共形窗口在 $0^\circ$ 沿轴瞬时扫描视场引入的非对称像差,为固定校正器的使用提供条件;从理论上证明了通过对飞机共形窗口内表面进行消像差设计,可以作为一种校正手段实现第一级静态校正。第二级静态校正,即使用固定校正器校正共形窗口引入的随扫描视场变化而变化的动态像差。阐明了飞机共形窗口像差的二级静态校正原理;基于该校正原理,给出了一个设计实例。

**关键词** 光学设计; 共形光学; 像差校正; 窗口; 旋转对称; 固定校正器

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0216001

## Two-Stage Static Correction of Aircraft Conformal Window Aberration

Zhao Chunzhu Cui Qingfeng Piao Mingxu Zhao Lidong

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

**Abstract** Aircraft conformal windows have asymmetrical shape and usually tilt relative to the imaging system behind. Thus, rotationally symmetrical fixed corrector having the simplest structure can not be applied to aberration correction for aircraft conformal windows. To simplify the structure of aircraft conformal correction system to the greatest extent, the two-stage static correction of aircraft conformal window aberration is presented. This solution makes fixed corrector applied to the aberration correction for aircraft conformal windows. The first stage static correction is to correct the asymmetrical aberration introduced by the conformal window at  $0^\circ$  field of regard along the axis based on some static correction method. This stage provides condition for using fixed corrector. It is proved theoretically that the first stage static correction can be achieved by designing the inner surface of the conformal window. The second static correction is to correct the dynamic aberration varying with the look angle introduced by the conformal window using fixed corrector. The two-stage static correction principle of aircraft conformal window aberration is clarified. Based on this principle, a design example is presented.

**Key words** optical design; conformal optics; aberration correction; window; rotational symmetry; fixed corrector

**OCIS codes** 220.2740; 220.1000; 220.3620

## 1 引言

Marushin P H等<sup>[1]</sup>报道了飞机上使用的一个共形光学系统的设计、加工和测试。在这个共形光学系统中,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 $30^\circ$ 全扫描视场(FOR)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

收稿日期: 2015-07-09; 收到修改稿日期: 2015-10-15

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,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)

视场的要求,系统中加入了一个旋转平台。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。随着扫描视场角(FOV)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。为了实现柱面镜在旋转的同时能够相对平移,系统在旋转平台上加入了一个平移平台,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系统的稳定性降低。一个更好的共形窗口像差校正方案应含有更少的移动元件且具有更加紧凑和稳定的结构。如果这对柱面镜组成的动态校正器能够被相对窗口位置固定的静态校正器所取代,这个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,使用动态校正器的目的是为了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,在椭球形共形导弹整流罩的动态像差校正技术中,已有多种静态校正器被研究<sup>[2-8]</sup>,其中结构最为简单的静态校正器是固定校正器。固定校正器由旋转对称光学元件组成且相对整流罩位置固定,是一种简单且稳定的静态校正器结构,是在实际应用中理想的校正设备。世界上第一个研制成功的导弹共形光学系统中使用的校正设备就是固定校正器<sup>[9]</sup>。但是,不同于旋转对称的共形导弹整流罩,飞机共形窗口形状非对称且常常相对于其后的成像系统倾斜,即使在 $0^\circ$ 沿轴扫描视场位置,窗口引入的像差也是非对称的,使用具有旋转对称面形的固定校正器无法对飞机共形窗口引入的非对称像差进行很好的校正。

为了最大程度简化飞机共形窗口校正系统的结构,本文提出了飞机共形窗口像差的二级静态校正,使得目前结构最为简单的固定校正器能够应用于飞机共形窗口的像差校正。阐明了飞机共形窗口像差的二级静态校正原理,并基于该校正原理,给出了一个设计实例。

## 2 飞机共形窗口像差的二级静态校正

### 2.1 第一级静态校正

第一级静态校正是指通过某种静态校正手段首先校正共形窗口在 $0^\circ$ 沿轴瞬时扫描视场引入的非对称像差,为固定校正器的使用提供条件。第一级静态校正手段并不唯一;下面将从理论上证明通过对飞机共形窗口内表面进行消像差设计,可以作为一种校正手段实现第一级静态校正。

#### 2.1.1 共形窗口引入的波像差与窗口表面矢高的关系

由于飞机共形窗口常常相对于其后的成像系统倾斜放置,因此,需要研究具有普遍意义的倾斜共形窗口引入的波像差。但为了更好的理解倾斜共形窗口引入的波像差,首先分析共形窗口在未倾斜的情况下引入的波像差。共形窗口引入的波像差可以用一条经过窗口的光线所走过的光程(OPL)与某一参考光线的光程之差表示。为了简化分析,假定窗口外表面和内表面的矢高相同,都为 $T(y)$ 。如图1(a)所示,一条经过窗口的给定光线所走过的光程能够被表示为

$$L_{\text{OPL}} = nd + 2t + (n - 1)[T(y_1) - T(y_2)], \quad (1)$$

式中 $n$ 为窗口材料的折射率, $d$ 为窗口厚度, $t$ 为光线在某一段空气中走过的路程。当一束沿轴光束经过窗口,选择主光线作为参考光线<sup>[9]</sup>,那么参考光线走过的光程能够被表示为

$$L_{\text{OPL}_{\text{ref}}} = nd + 2t. \quad (2)$$

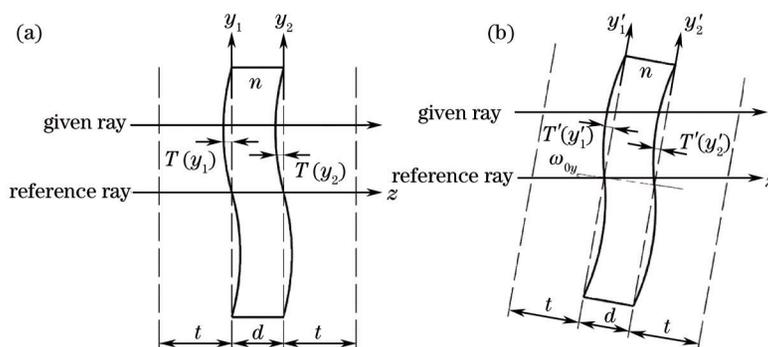


图1 (a) 光线经过未倾斜的窗口所走过的光程长度; (b) 光线经过倾斜的窗口所走过的光程长度

Fig.1 (a) Optical path length of a ray passing through an untilted window; (b) optical path length of a ray passing through a tilted window

将窗口的表面矢高表示为二维坐标  $x$  和  $y$  的函数, 即  $T(x, y)$ , 则当一束沿轴光束经过窗口时, 窗口引入的波像差为

$$W(x, y)_{\text{unilted}} = L_{\text{OPL}} - L_{\text{OPL}_{\text{ref}}} = (n - 1)[T(x_1, y_1) - T(x_2, y_2)]. \quad (3)$$

(3)式代表了未倾斜的共形窗口引入的波像差, 其中坐标  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  分别是给定光线与窗口外表面和内表面的交点坐标。

下面分析共形窗口在倾斜的情况下引入的波像差。为了简化分析, 假定窗口外表面和内表面的面形矢高相同, 都为  $T'(y')$ , 其中  $y'$  表示倾斜窗口表面上的局部坐标位置。如图 1(b)所示, 一条给定光线经过窗口, 它与窗口外表面的交点坐标可以表示为  $(0, y)$ , 其中  $y$  为全局  $y$  坐标。这条给定光线走过的光程能够被表示为

$$L_{\text{OPL}} = \frac{nd}{\cos \omega_{0y}} + \frac{2t}{\cos \omega_{0y}} + \left( \frac{n}{\cos \omega_{0y}} - \frac{1}{\cos \omega_{0y}} \right) [T'(y'_1) - T'(y'_2)], \quad (4)$$

式中  $\omega_{0y}$  是在该给定光线与参考光线所在截面内窗口中心轴线与全局  $z$  坐标轴的夹角,  $\omega'_{0y} = \arcsin(\sin \omega_{0y} / n)$ ,  $y'_1$  和  $y'_2$  分别是倾斜窗口外表面和内表面上的局部坐标位置。当一束沿轴光束经过窗口, 选择主光线作为参考光线, 那么参考光线走过的光程能够被表示为

$$L_{\text{OPL}_{\text{ref}}} = \frac{nd}{\cos \omega_{0y}} + \frac{2t}{\cos \omega_{0y}}. \quad (5)$$

由于窗口倾斜, 参考光线不再经过窗口内表面面形矢高的中心, 但参考光线经过的窗口内表面矢高位置在面形中心的附近, 矢高值很小, 因此在(5)式中忽略了这一微小矢高对光程的影响。将窗口的表面矢高表示为二维局部坐标  $x'$  和  $y'$  的函数, 即  $T'(x', y')$ , 则当一束沿轴光束经过窗口时, 倾斜的共形窗口引入的波像差为

$$W(x, y)_{\text{ilted}} = L_{\text{OPL}} - L_{\text{OPL}_{\text{ref}}} = \left( \frac{n}{\cos \omega_{xy}} - \frac{1}{\cos \omega_{xy}} \right) [T'(x'_1, y'_1) - T'(x'_2, y'_2)], \quad (6)$$

式中  $\omega_{xy}$  是在给定光线与参考光线所在截面内窗口中心轴线与全局  $z$  坐标轴的夹角, 其中给定光线与窗口外表面相交于全局坐标  $(x, y)$ , 给定光线的坐标不同,  $\omega_{xy}$  也会随之变化;  $\omega'_{xy} = \arcsin(\sin \omega_{xy} / n)$ ; 坐标  $(x'_1, y'_1)$  和  $(x'_2, y'_2)$  分别是给定光线与倾斜窗口外表面和内表面的交点局部坐标。(6)式并没有限制窗口的倾斜方位, 窗口可以在空间任意方位产生倾斜。

### 2.1.2 共形窗口内表面消像差附加矢高

为实现第一级静态校正, 需要使倾斜共形窗口在沿轴视场引入的波像差  $W(x, y)_{\text{ilted}}$  等于 0。由(6)式可知, 波像差  $W(x, y)_{\text{ilted}}$  由两个相乘的因式组成, 其中第一个因式  $\left( \frac{n}{\cos \omega_{xy}} - \frac{1}{\cos \omega_{xy}} \right)$  是变量且不等于 0; 第二个因式与表面矢高有关, 因此, 希望通过修改内表面矢高, 使第二个因式等于 0。将一个附加矢高  $\Delta T'_2(x'_2, y'_2)$  增加到窗口内表面面形矢高中, 则(6)式可以重新写为

$$W(x, y)_{\text{ilted}} = \left( \frac{n}{\cos \omega_{xy}} - \frac{1}{\cos \omega_{xy}} \right) [T'(x'_1, y'_1) - T'(x'_2, y'_2) - \Delta T'_2(x'_1, y'_1)]. \quad (7)$$

令窗口内表面附加矢高  $\Delta T'_2(x'_2, y'_2)$  的表达式为

$$\Delta T'_2(x'_2, y'_2) = T'(x'_1, y'_1) - T'(x'_2, y'_2), \quad (8)$$

则倾斜共形窗口在沿轴视场引入的波像差  $W(x, y)_{\text{ilted}}$  等于 0。从光程角度考虑, 窗口内表面消像差附加矢高补偿了窗口在沿轴视场引入的光程差, 使得第一级静态校正从理论上能够实现。在(8)式中, 仅给出了窗口内表面附加矢高的抽象表达式; 在实际设计中, 结合具体的窗口表面面形, 基于实际光线追迹的 optical design software 能够优化得到最佳的内表面消像差附加矢高, 并且内表面附加矢高的作用主要是校正窗口在沿轴视场引入的非对称像差, 残余的旋转对称像差可以通过窗口后加入固定校正器补偿。不同于导弹共形整流罩, 飞机共形窗口因外形与飞机外形轮廓相匹配, 使得窗口表面矢高小且面形变化平缓, 因此, 由(8)式可知, 窗口内表面消像差附加矢高值是很小的, 不会明显改变窗口内表面面形。

### 2.2 第二级静态校正

在第一级静态校正后,共形窗口在0°沿轴瞬时扫描视场引入的像差得到校正,剩余的像差是在其余扫描视场残留的像差,这些像差主要是非对称像差且随扫描视场变化而变化。

第二级静态校正是指使用结构最简单的固定校正器校正共形窗口引入的随扫描视场变化而变化的动态像差。在共形窗口后面加入具有旋转对称面形的固定校正器,当扫描视场角偏离0°时,成像系统的光轴偏离了固定校正器的中心轴线,以成像系统光轴作为参考,那么固定校正器就产生了倾斜和偏心。依据矢量像差理论,含有倾斜偏心旋转对称元件的光学系统的三级波像差表达式为<sup>[10]</sup>

$$W = \Delta W_{20}(\rho \cdot \rho) + \Delta W_{11}(H \cdot \rho) + \sum_j W_{040_j}(\rho \cdot \rho)^2 + \sum_j W_{131_j}[(H - \sigma_j) \cdot \rho](\rho \cdot \rho) + \sum_j W_{222_j}[(H - \sigma_j) \cdot \rho]^2 + \sum_j W_{220_j}[(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)](\rho \cdot \rho) + \sum_j W_{311_j}[(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)][(H - \sigma_j) \cdot \rho] \quad (9)$$

式中  $\rho$  为孔径矢量,  $H$  为视场矢量,  $\sigma_j$  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。从(9)式可以看出,在5种初级像差中,除球差项与偏移矢量  $\sigma_j$  无关外,其余几种像差均受倾斜偏心的影响;倾斜偏心元件导致彗差和像散节点偏离像面中心,并且随着倾斜偏心量的增大,彗差和像散节点离开像面,使得整个像面存在大量彗差和像散。因此,在非零扫描视场,固定校正器相当于存在倾斜偏心,因此能够校正窗口引入的非对称像差;同时,随着扫描视场的变化,光束在固定校正器上的有效区域也发生变化,相当于固定校正器的倾斜偏心量改变了,其引入的像差也将改变,为校正窗口引入的随扫描视场变化而变化的动态像差提供了可能。

## 3 设计实例

### 3.1 一个共形光学系统的初始建模

选取文献[1]中给出的飞机共形光学系统的相关设计参数作为所设计的共形光学系统的各项参数;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2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;形状为双曲面面,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°。系统的光阑被放置在理想透镜处。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需要满足激光探测<sup>[11-14]</sup>的要求,激光波长为632.8 nm,因此选择激光波长632.8 nm作为系统的设计波长。在设计优化过程中,选取的采样波长包括486.1、587.6、632.8、656.3 nm,波长权重均为1。探测器为一个2/3英寸(1.69 cm)电荷耦合器件(CCD),它被放置在理想透镜的焦平面上。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

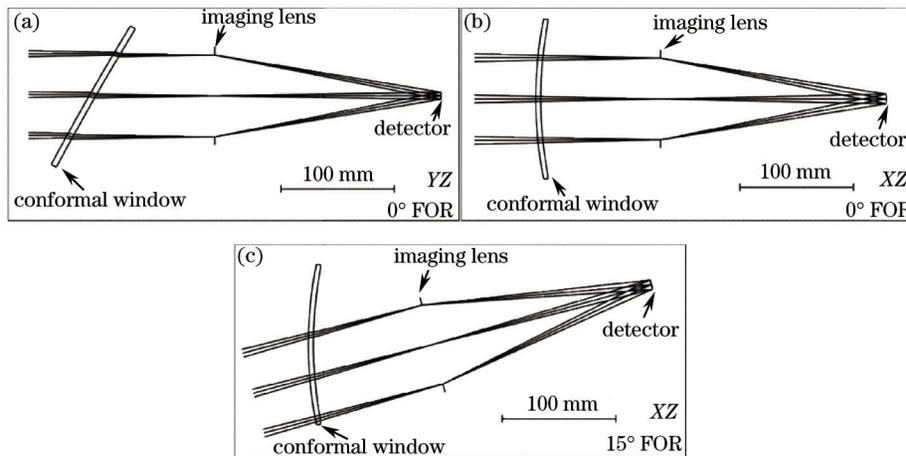


图2 初始系统结构图。(a) 0°扫描视场YZ平面内的结构图;(b) 0°扫描视场XZ平面内的结构图;  
(c) 15°扫描视场XZ平面内的结构图

Fig.2 Initial system layout. (a) Layout of 0° FOR in YZ plane; (b) layout of 0° FOR in XZ plane; (c) layout of 15° FOR in XZ plane

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,系统的设计目标是使系统在各扫描视场位置的波像差均不超过1个波长<sup>[11,15-16]</sup>。由于共形窗口关于YZ平面对称,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3中的黑点处。

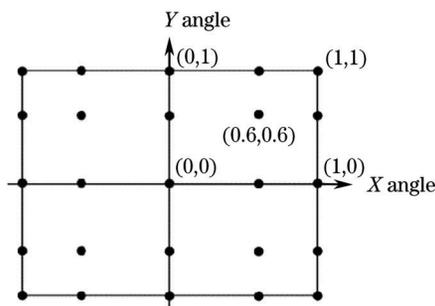


图3  $3^\circ$ 全视场角范围内采样视场点的归一化坐标

Fig.3 Normalized coordinates of sampled field points across  $3^\circ$  full FOV

### 3.2 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4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4中仅给出 $0^\circ$ 视场角引入的波像差情况。由图4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。

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交叉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映了引入相应像差的量值。图5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5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。

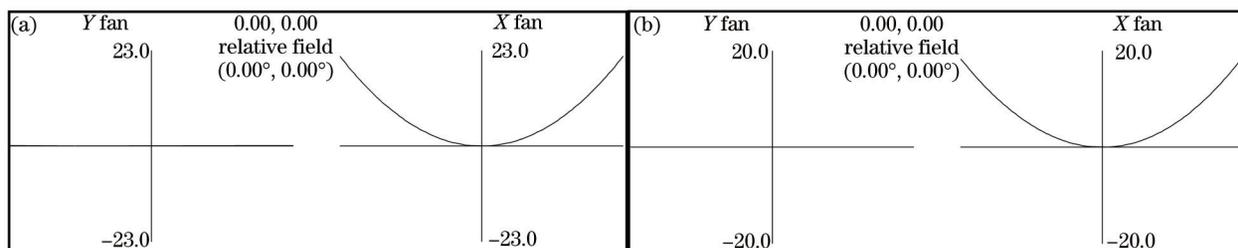


图4 初始系统的波前图。(a)  $0^\circ$ 扫描视场波前图;(b)  $15^\circ$ 扫描视场波前图

Fig.4 Wave fans of the initial system. (a) Wave fans at  $0^\circ$  FOR; (b) wave fans at  $15^\circ$  FOR

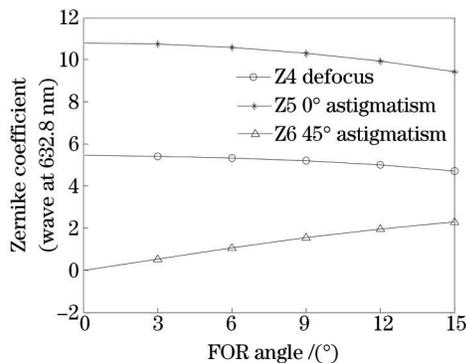


图5 共形窗口引入的主要Zernike像差

Fig.5 Predominant Zernike aberrations introduced by conformal window

### 3.3 第一级静态校正

依据2.1节对第一级静态校正原理的论述,采用对共形窗口内表面进行消像差设计的手段,实现第一级

静态校正。在设计策略上,首先选择较简单的光学面形设计窗口内表面,如球面,旋转对称非球面,柱面,双曲率面等;如果校正效果不好,则使用更为复杂的面形,如自由曲面。在3.1节中,初始建模的共形窗口外表面和内表面面形相同,都为双曲率面;尝试通过光学设计软件Code V优化窗口内表面两个方向的曲率半径,使其尽量校正共形窗口在0°扫描视场引入的像差。经过优化,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6所示。由图6可知,共形窗口在0°瞬时扫描视场引入的非对称像散已得到校正,第一级静态校正完成。

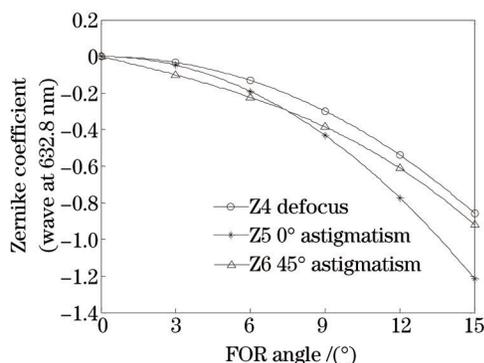


图6 第一级静态校正后,共形光学系统的残余Zernike像差

Fig.6 Residual Zernike aberrations of conformal optical system after first stage static correction

### 3.4 第二级静态校正

在第一级静态校正的基础上,在窗口后面加入固定校正器;选择校正器的表面面形为旋转对称的偶次非球面。通过光学设计软件Code V对窗口内表面和固定校正器设计优化后,得到整个共形光学系统的结构图如图7所示。将图7中共形窗口前表面至第二个光学校正元件后表面分别编号为表面1~6;给出图7中共形窗口和固定校正器的结构参数如表1所示,其中每个校正元件的非球面系数如表2所示。由表1可知,共形窗口内表面在优化前后面形矢高变化较小。固定校正器由两个校正元件组成且相对于共形窗口的位置固定。选择氟化镁(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>[17]</sup>。窗口外表面至理想成像透镜的沿轴距离仅为80 mm,系统结构较为紧凑。在全扫描视场范围内,使用的窗口口径为115 mm,小于给定的窗口尺寸。优化后共形光学系统在0°视场角引入的主要Zernike像差随扫描视场的变化情况如图8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。

表1 共形窗口和固定校正器的结构参数

Table 1 Configuration parameters of conformal window and fixed corrector

Surface	Surface type	Y radius /mm	X radius /mm	Thickness /mm	Material	Clear aperture /mm
1	Anamorphic asphere	2438.4	304.8	5.08	Sapphire	115
2	Anamorphic asphere	2477.56	303.25			
3	Even asphere	-500.097	\	10	MgF <sub>2</sub>	94
4	Even asphere	-340.682	\			
5	Even asphere	-235.326	\	9	MgF <sub>2</sub>	87
6	Even asphere	-307.275	\			

表2 校正元件的非球面系数

Table 2 Aspheric surface coefficients of correction elements

Surface	4 <sup>th</sup> order coefficient	6 <sup>th</sup> order coefficient
3	1.596070×10 <sup>-7</sup>	4.809368×10 <sup>-12</sup>
4	2.720918×10 <sup>-7</sup>	-4.586247×10 <sup>-12</sup>
5	1.123372×10 <sup>-7</sup>	-2.831864×10 <sup>-11</sup>
6	-7.204555×10 <sup>-9</sup>	-1.710729×10 <sup>-11</sup>

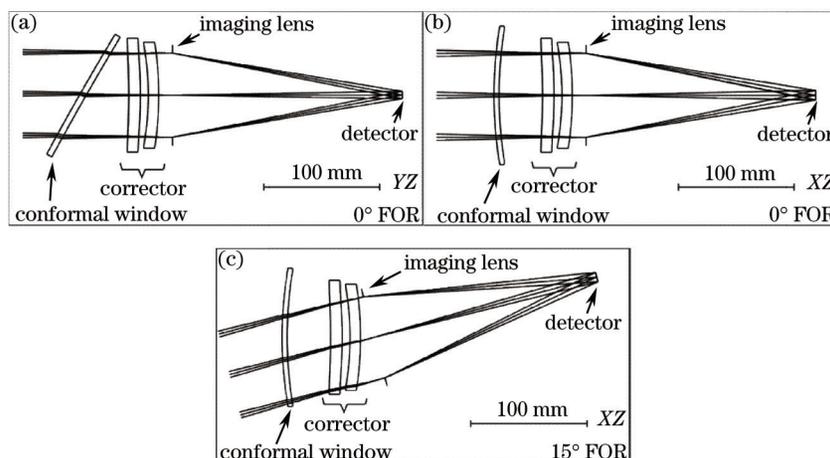


图7 系统结构图。(a) 0°扫描视场YZ平面内的结构图; (b) 0°扫描视场XZ平面内的结构图; (c) 15°扫描视场XZ平面内的结构图  
Fig.7 System layout. (a) Layout of 0° FOR in YZ plane; (b) layout of 0° FOR in XZ plane; (c) layout of 15° FOR in XZ plane

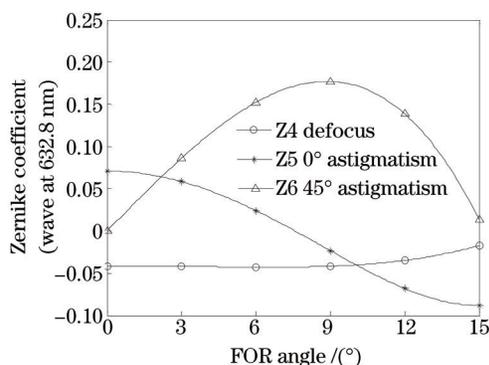


图8 二级静态校正后,共形光学系统的残余Zernike像差

Fig.8 Residual Zernike aberrations of conformal optical system after two-stage static correction

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。二级静态校正后共形光学系统的波前图如图9所示。在图9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最大,因此在图9中仅给出了具有代表性的0°和15°扫描视场的波前图。由图9可知,在0°扫描视场和15°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。二级静态校正后共形光学系统在0°和15°扫描视场位置的复色调制传递函数(MTF)曲线分别如图10(a)和10(b)所示。由图10可知,在0°和15°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。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

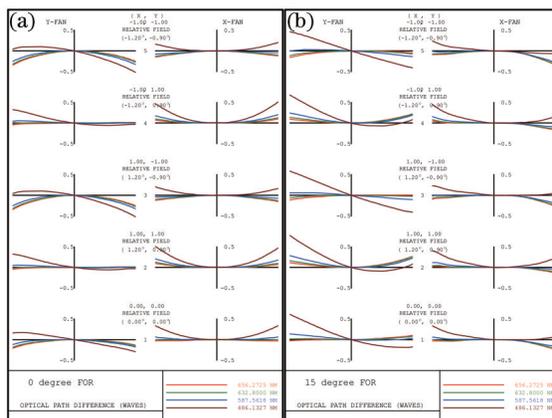


图9 二级静态校正后的共形光学系统的波前图。(a) 0°扫描视场; (b) 15°扫描视场

Fig.9 Wave fans of conformal optical system after two-stage static correction. (a) 0° FOR; (b) 15° FOR

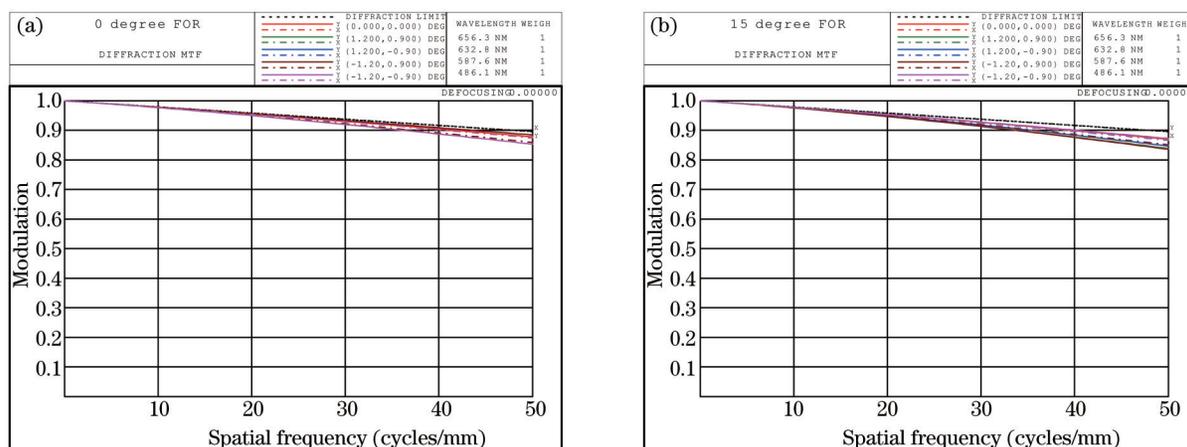


图 10 二级静态校正后的共形光学系统的 MTF 曲线。(a) 0°扫描视场; (b) 15°扫描视场

Fig.10 MTF curves of conformal optical system after two-stage static correction. (a) 0° FOR; (b) 15° FOR

学系统在各扫描视场位置的畸变均小于 0.43%, 几乎可以忽略。

为了判断二级静态校正后的共形光学系统结构是否为最优解, 利用光学设计软件 Code V 中 Global Synthesis 功能对系统进行全局优化。设置每个子优化的最大环数为 100, 最小环数为 10, 每环误差函数值的最小变化量为  $1 \times 10^{-5}$ , 以尽量使每个子优化误差函数值最小。经全局优化, 得到 153 个优化结果文件。从中选出误差函数值最小的 10 个优化结果文件与全局优化前的原文件进行对比, 如图 11 所示。横坐标表示不同优化结果文件的名称, 其中 0 为原文件, 1~10 为全局优化后选出的误差函数值最小的 10 个优化结果文件; 纵坐标表示各优化结果的误差函数值。由图 11 可以看出, 原文件的误差函数值为 1.01, 10 个全局优化结果文件的最小误差函数值为 0.972, 与原文件的差值为 0.038, 表明经全局优化并没有得到误差函数值明显减小的优化结果。对比原文件的系统结构与 10 个优化文件的系统结构, 窗口内表面面形差别很小, 主要的差别在固定校正元件表面的偶次非球面面形上; 并且相比于其他结构, 原文件校正元件面形变化较为平缓。因此, 经过二级静态校正后的共形光学系统结构已经接近最优解。

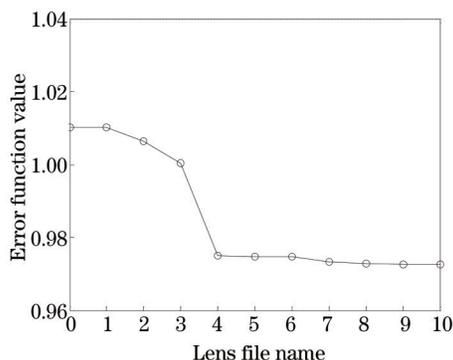


图 11 全局优化结果

Fig.11 Results of global synthesis

## 4 结 论

以最大程度简化飞机共形校正系统结构为研究出发点, 提出了飞机共形窗口像差的二级静态校正, 使得目前结构最为简单的旋转对称固定校正器能够应用于飞机共形窗口的像差校正。并且从理论上证明了通过对飞机共形窗口内表面进行消像差设计, 可以作为一种校正手段实现第一级静态校正。在阐明二级静态校正原理的基础上, 给出了一个设计实例。在实例中, 通过设计共形窗口内表面, 实现了第一级静态校正; 通过加入固定校正器, 实现了第二级静态校正; 经过二级静态校正, 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, 系统在 50 lp/mm 处 MTF 值均在 0.8 以上, 满足设计要求。通过进一步系统全局优化, 结果表明经二级静态校正后的共形光学系统结构已接近最优解。设计实例验证了二级静态校正的可

行性。提出的二级静态校正为飞机共形窗口像差校正提供了一个简单且稳定的静态校正参考方案。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Sparrold S W. Arch corrector for conformal optical systems[C]. SPIE, 1999, 3705: 189–200.
- 3 Knapp D J, Mills J P, Hegg R G, *et al.*. Conformal optics risk reduction demonstration[C]. SPIE, 2001, 4375: 146–153.
- 4 Li Dongxi, Lu Zhenwu, Sun Qiang, *et al.*. A research of conformal optical system based on Wassermann–Wolf equations[J]. Acta Phys Sin, 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.
- 5 Sun Jinxia, Sun Qiang, Li Dongxi, *et al.*. Conformal dome aberration correction with diffractive elements[J]. Acta Phys Sin, 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.
- 6 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.
- 7 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球形窗口光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022003.
- 8 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.
- 9 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 343–355.
- 10 Thompson K P. Aberration Fields in Tilted and Decentered Optical Systems[D]. Arizona: University of Arizona, 1980: 23–56.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 Xu Xinhang, Chen Ning, Wang Bing, *et al.*. Design of compact middle-wave infrared camera used on airborne platform[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0816002.  
徐新行, 陈 宁, 王 兵, 等. 机载紧凑型中波红外相机的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0816002.
- 16 Wu Yanxiong, Wu Hongbo, Zhang Jizhen, *et al.*. Optical system design of star camera with high precision better than second level[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0716001.  
伍雁雄, 吴洪波, 张继真, 等. 亚秒级甚高精度星相机光学系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0716001.
- 17 Schaefer J, Eichholtz R A, Sulzbach F C, *et al.*. Fabrication challenges associated with conformal optics[C]. SPIE, 2001, 4375: 128–137.

栏目编辑: 韩 峰