

基于倾斜光学元件的共形光学窗口瞄视误差校正

赵春竹 崔庆丰

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为校正共形光学窗口引入的随扫描视角变化而变化的动态瞄视误差, 提出基于倾斜光学元件的瞄视误差校正。建立共形光学窗口的瞄视误差模型, 并分析计算共形光学窗口引入的动态瞄视误差。阐明利用倾斜光学元件校正共形光学窗口瞄视误差的原理, 并通过在共形光学窗口后加入倾斜的球面透镜予以证明。给出一个设计实例, 通过将校正共形光学窗口像差的校正元件倾斜, 实现共形光学窗口的瞄视误差校正, 且并未影响共形光学窗口像差的校正。

关键词 光学设计; 共形光学; 光学窗口; 瞄视误差; 倾斜

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0422005

Boresight Error Correction of Conformal Optical Window with Tilted Optical Elements

Zhao Chunzhu Cui Qingfeng

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

Abstract An optical solution to boresight error using tilted optical elements is presented. It can correct dynamic boresight error for conformal windows which vary with look angle. A model of boresight error for conformal windows is established, and dynamic boresight error introduced by a conformal window is calculated. The principle of boresight error correction of conformal optical windows with tilted optical elements is stated, which is proved by adding a tilted spherical lens behind a conformal window. A design example is presented, and by tilting the corrector which is used to correct the conformal window aberration, the boresight error for the conformal window is corrected while the aberration correction for the window is not hindered.

Key words optical design; conformal optics; optical window; boresight error; tilt

OCIS codes 220.2740; 220.3630; 220.3620

1 引言

共形光学元件是指外形与系统平台相吻合的光学窗口和光学整流罩。这类光学元件主要应用于飞机和导弹中, 以减小空气阻力, 提升系统性能^[1]。但具有非常规外形的共形窗口和整流罩会引入大量随扫描视角变化而变化的动态非对称像差和瞄视误差。如何实现这些动态像差和动态瞄视误差的校正成为共形光学设计必须解决的问题^[2]。在像差校正方面, 已有多种重要的校正途径^[3-13]。在瞄视误差校正方面, 目前可采用的方法是在控制系统中加入补偿环节, 实时动态地校正随扫描视角变化而变化的瞄视误差^[14-15]。但这种校正方法增加了控制系统的复杂程度且需要较高的补偿控制精度。R I Joseph等^[16]学者证明了通过改变椭球形共形整流罩内表面面形, 有可能使某一入射光线经过椭球形整流罩后不发生偏折。该研究为瞄视误差

收稿日期: 2015-11-23; 收到修改稿日期: 2015-12-06

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, 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)

校正提供了一个光学思路,但这种方法即使可行,也仅能校正某一扫视角引入的瞄视误差,在其余扫描视
角仍有残余瞄视误差无法得到校正。

基于飞机共形光学窗口的应用,本文提出了一种利用倾斜光学元件校正共形光学窗口动态瞄视误差的
光学途径。在建立瞄视误差模型的基础上,阐明了这种光学校正途径的原理,并给出了一个设计实例。设
计实例结果表明,通过将校正共形窗口像差的校正元件倾斜,能够实现共形窗口动态瞄视误差的校正,且
不影响共形窗口像差的校正。因此,该光学校正途径不需要增加校正元件也不含有动态移动的校正元件。

2 共形光学窗口瞄视误差建模

瞄视误差是视线的偏差,反映在像空间,瞄视误差是指观测方位的目标在探测系统像面上的实际成像
位置相对于理想成像位置的偏差。传统的飞机光学窗口多为平板或由多块平板拼接的窗口。因这类窗口
内外表面法线平行,瞄视方向入射的主光线经平板窗口出射后不发生偏折,因此不引入瞄视误差。但共形
光学窗口因其非常规的外形引入了不可忽略的瞄视误差。目前,公认较为适合的飞机共形窗口外形是非对
称的双曲率面形。基于飞机应用,光学窗口常常相对于其后的扫描成像系统是倾斜的^[9]。如图1所示,从物
方瞄视方向入射的主光线经过倾斜的共形窗口,因主光线与窗口内外表面交点处表面法线不平行,导致主
光线从共形窗口出射后偏离光轴方向,最终在像面上的位置偏离了像面中心,这一偏离量就是共形窗口引
入的瞄视误差。随着窗口后扫描成像系统扫描视角的变化,瞄视主光线在像面上的位置也随之变化。因
此,瞄视误差是扫描视角的函数,其与主光线偏离瞄视方向的角度关系可以用下式表示:

$$\varepsilon(\varphi) = |f \cdot \tan[\Delta\theta(\varphi)]|, \quad (1)$$

式中 $\varepsilon(\varphi)$ 为瞄视误差, φ 为扫描视角, f 为扫描成像系统的焦距, $\Delta\theta(\varphi)$ 为像空间主光线相对瞄视方向的偏
角。符号规定:如果主光线在像空间位于光轴的上侧, $\Delta\theta(\varphi)$ 为正。

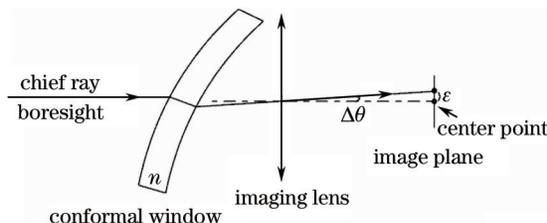


图1 共形光学窗口引入的瞄视误差示意图

Fig.1 Schematic plot of boresight error introduced by a conformal optical window

3 共形光学窗口瞄视误差计算分析

基于飞机应用,建模了一个共形光学系统,如图2所示。该共形光学系统的各参数是由亚利桑那大学与
雷神公司基于飞机应用共同确定的^[3]。共形窗口材料为蓝宝石,厚度为5.08 mm,具有双曲率面形,在Y方向
的曲率半径为2438.4 mm,在X方向的曲率半径为304.8 mm。图2中+Z轴指向光线传播方向,YZ截面为子午
面,XZ截面为弧矢面。共形窗口在YZ截面内相对其后的扫描成像系统倾斜30°。扫描成像系统用理想透镜
代替,其焦距为200 mm, F数为2.8。系统的光阑与理想成像透镜重合。扫描成像系统在Y方

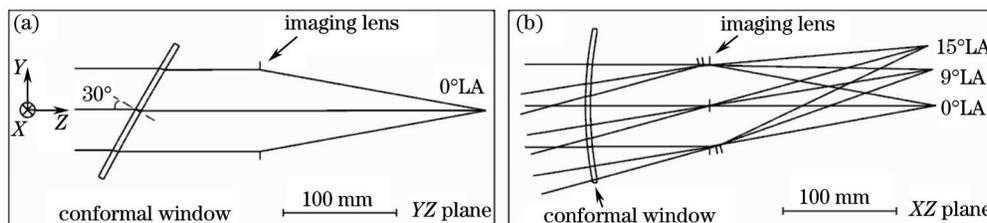


图2 共形光学系统结构图。(a) YZ平面内0°扫描视角的结构图;(b) XZ平面内0°、9°和15°扫描视角叠加的结构图

Fig.2 Layouts of a conformal optical system. (a) Layout for 0° look angle in YZ plane;

(b) layout for 0° LA, 9° LA and 15° LA in XZ plane

向的扫描角度(LA)范围为 0° ,在 X 方向的扫描角度范围为 $\pm 15^\circ$ 。由于倾斜的共形窗口仍关于 YZ 平面对称,因此只需考虑 $0^\circ \sim 15^\circ$ 的 X 方向扫描角度范围。基于激光探测要求^[17-19],系统分析波长为 632.8 nm 。

基于实际光线追迹,得到瞄视主光线经共形窗口出射后,在像空间偏离瞄视方向的角度 $\Delta\theta(\varphi)$ 和产生的瞄视误差 $\varepsilon(\varphi)$ 如图3所示。在 0° 扫描视角,共形窗口引入的瞄视误差 $\varepsilon(0)$ 为 0.12 mm 。随着扫描视角的增大,瞄视误差的量值也随之增大。在 15° 扫描视角,共形窗口引入的瞄视误差 $\varepsilon(15)$ 增大到 0.59 mm 。由图3可以看出,共形窗口引入的瞄视误差随扫描视角动态变化,且变化幅度较为剧烈。

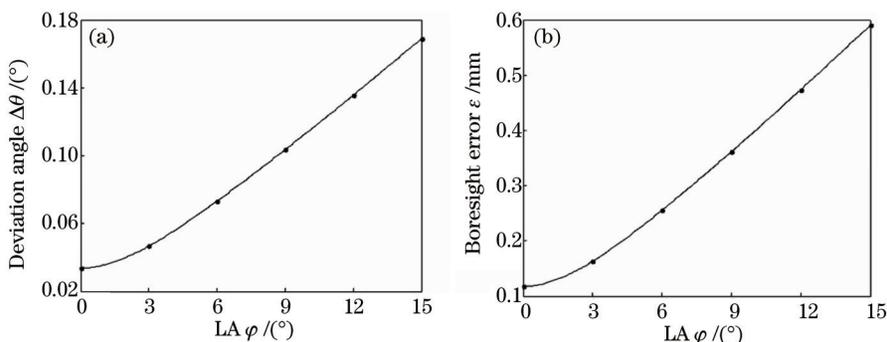


图3 共形光学窗口引入的(a)瞄视偏离角 $\Delta\theta$ 和(b)瞄视误差 ε

Fig.3 (a) Boresight deviation angle $\Delta\theta$ and (b) boresight error ε introduced by conformal window

4 利用倾斜光学元件校正共形光学窗口的瞄视误差

共形光学窗口引入瞄视误差的原因是瞄视主光线与窗口内外表面交点处表面法线不平行。事实上,除平行平板外,入射光线经过一个倾斜的光学元件,其与倾斜光学元件的两个表面交点处法线也不平行,因此,从倾斜光学元件出射后也将产生角度偏折。如图4所示,瞄视主光线经共形窗口出射后产生的偏折角为 ΔD_w 。在共形窗口与扫描成像系统中间加入一个倾斜的系统,主光线经倾斜系统出射后产生的偏折角为 ΔD_c 。符号规定:从光学元件出射的光线顺时针旋转到入射光线方向,则该光学元件产生的偏折角 ΔD 为正值。随着扫描视角的变化,瞄视主光线与窗口及倾斜系统的表面交点位置变化,导致产生的偏折角也变化。所以, ΔD_w 和 ΔD_c 均是扫描视角的函数,可以表示为 $\Delta D_w(\varphi)$ 和 $\Delta D_c(\varphi)$ 。最终主光线在像空间相对瞄视方向的偏角 $\Delta\theta(\varphi)$ 可以表示为:

$$\Delta\theta(\varphi) = \Delta D_w(\varphi) + \Delta D_c(\varphi), \quad (2)$$

当倾斜系统引入的偏折角恰好抵消共形窗口引入的偏折角,即 $\Delta D_c(\varphi) = -\Delta D_w(\varphi)$ 时, $\Delta\theta(\varphi) = 0$ 。由(1)式可知,此时 $\varepsilon(\varphi) = 0$,共形光学系统的动态瞄视误差得到校正。

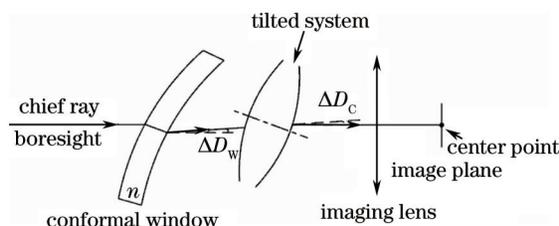


图4 利用倾斜系统校正共形光学窗口瞄视误差示意图

Fig.4 Schematic plot of the boresight error correction for a conformal window with tilted system

为了证明倾斜光学元件能够校正共形光学窗口的动态瞄视误差,在第3节建模的共形窗口后加入一个在 YZ 平面内倾斜的球面透镜,透镜材料为氟化镁(MgF_2)。通过限制瞄视主光线在像面上的位置与像面中心重合,优化透镜的曲率半径和倾斜量。优化后的系统结构图如图5所示,球面透镜在 YZ 平面内倾斜了 4.2° 。由于倾斜球面透镜也与 YZ 平面对称,因此仍只需考虑 $0^\circ \sim 15^\circ$ 的 X 方向扫描角度范围。基于实际光线追迹得到主光线在像空间偏离瞄视方向的角度 $\Delta\theta(\varphi)$ 和系统的瞄视误差 $\varepsilon(\varphi)$ 如图6所示。在各扫描视角,系统的瞄视误差均小于 $50 \mu\text{m}$ 。与图3相比,通过加入倾斜的球面透镜,系统的动态瞄视误差大幅减小。

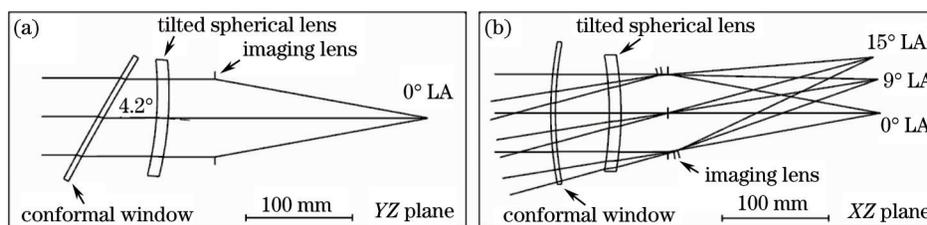


图5 加入倾斜球面透镜的共形光学系统结构图。(a) YZ平面内0°扫描视角的结构图;
(b) XZ平面内0°、9°和15°扫描视角叠加的结构图

Fig.5 Layouts of a conformal optical system with tilted spherical lens. (a) Layout for 0° LA in YZ plane;
(b) layout for 0° LA, 9° LA and 15° LA in XZ plane

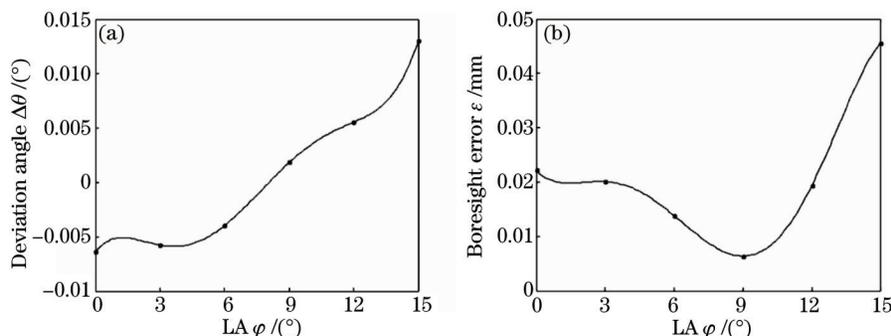


图6 共形光学系统的(a) 瞄视偏离角 $\Delta\theta$ 和(b) 瞄视误差 ε

Fig.6 (a) Boresight deviation angle $\Delta\theta$ and (b) boresight error ε of the conformal optical system

从像差校正的角度考虑,依据倾斜光学系统的像差理论^[20-21],光学表面的倾斜将造成光学系统像面上像差场中心偏移,用 σ 表示这一偏移量。定义未倾斜光学系统视场矢量为 H ,则含倾斜光学表面的光学系统有效视场矢量 H_A 可以表示为:

$$H_A = H - \sigma, \quad (3)$$

光学系统的波像差是视场矢量的函数,视场矢量的变化使得倾斜光学系统呈现独特的波像差特性。因此,在倾斜的共形窗口后面加入倾斜光学元件,有利于补偿倾斜共形窗口引入的像差,实现共形窗口像差与瞄视误差的同时校正。

5 设计实例

为了证明利用倾斜光学元件校正共形窗口瞄视误差这一光学途径可以与共形窗口像差校正途径融合,实现共形窗口像差和瞄视误差的同时校正,设计了一个已校正共形窗口像差的共形光学系统,如图7所示。在第3节建模的共形窗口后加入两片 MgF_2 校正元件,校正元件的表面面形为偶次非球面。通过优化共形窗口内表面在X方向和Y方向的曲率半径及校正元件面形参数,实现共形窗口像差的校正。由于共形光学系统不具有旋转对称性,传统的赛德尔像差无法准确描述系统的残余像差,采用泽尼克多项式像差理论分析系统在出瞳面上的像差特性^[22]。通过应用条纹泽尼克项系数表示相应像差的量值,得到该共形光学系统沿轴视场残余三级像差和五级像差随扫描视角的变化曲线,如图8所示。其中 $Z_5 \sim Z_9$ 泽尼克项代表三级像差, $Z_{10} \sim Z_{16}$ 泽尼克项代表五级像差。从各泽尼克系数曲线可以看出,在各扫描视角系统的残余像差均小于0.2个波长。系统在X方向的半视场角为 1.2° ,在Y方向的半视场角为 0.9° ^[3];由于系统视场角较小,在其余视场点的残余像差与沿轴视场差别不大。基于实际光线追迹得到该共形光学系统主光线在像空间偏离瞄视方向的角度 $\Delta\theta(\varphi)$ 和系统瞄视误差 $\varepsilon(\varphi)$ 如图9所示。在 15° 扫描视角,系统的瞄视误差最大,为0.24 mm。图8和图9表明共形光学系统的像差得到校正,但仍存在瞄视误差。并且通过在优化中限制主光线的位置与像面中心重合,并不能减小系统瞄视误差。

在系统原有优化变量的基础上将两个校正元件在YZ面内的倾斜也设为变量,限制主光线在像面上的

位置与中心重合进行优化,优化结果如图 10 所示。其中第一个校正元件绕 X 轴顺时针倾斜了 3.9° ,第二个校正元件绕 X 轴顺时针倾斜了 3.4° 。由于两个校正元件均在 YZ 平面内倾斜,仍关于 YZ 平面对称,因此只需考虑 $0^\circ \sim 15^\circ$ 的 X 方向扫描角度范围。最终共形光学系统的三级和五级像差曲线如图 11 所示。从各泽尼克系数曲线可以看出,在各扫描视角系统的残余像差均小于 0.15 个波长。相比于图 8,系统的残余像差不但没有增加,反而有少量的减小。基于实际光线追迹得到该共形光学系统主光线在像空间偏离瞄视方向的角度 $\Delta\theta(\varphi)$ 和系统瞄视误差 $\varepsilon(\varphi)$ 如图 12 所示。在各扫描视角,系统的残余瞄视误差均小于 $35 \mu\text{m}$ 。相比于图 9,系统的瞄视误差大幅减小。图 11 和图 12 表明共形光学系统的动态像差和动态瞄视误差均基本得到校正。

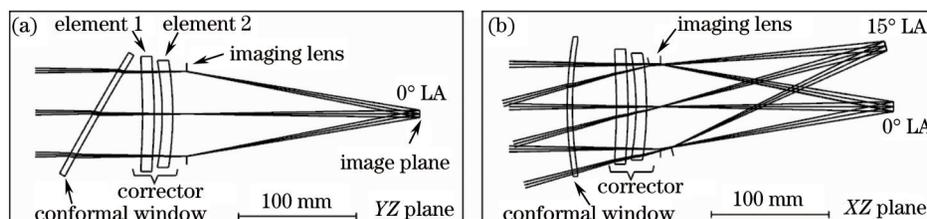


图 7 已校正像差的共形光学系统结构图。(a) YZ 平面内 0° 扫描视角的结构图; (b) XZ 平面内 0° 和 15° 扫描视角叠加的结构图

Fig.7 Layouts of a conformal optical system with aberration corrected. (a) Layout for 0° LA in YZ plane; (b) layout for 0° LA and 15° LA in XZ plane

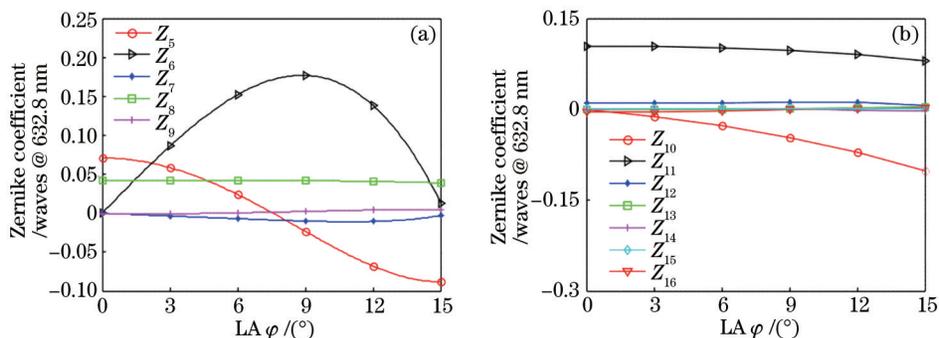


图 8 在各扫描视角共形光学系统残余的(a)三级像差和(b)五级像差

Fig.8 Residual (a) third order aberrations and (b) fifth order aberrations for conformal optical system at different LAs

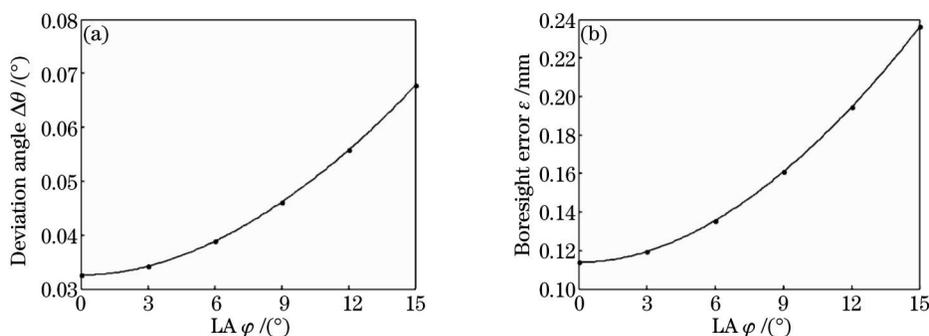


图 9 已校正像差的共形光学系统的(a)瞄视偏离角 $\Delta\theta$ 和(b)瞄视误差 ε

Fig.9 (a) Bore sight deviation angle $\Delta\theta$ and (b) bore sight error ε of conformal optical system with the corrected aberration

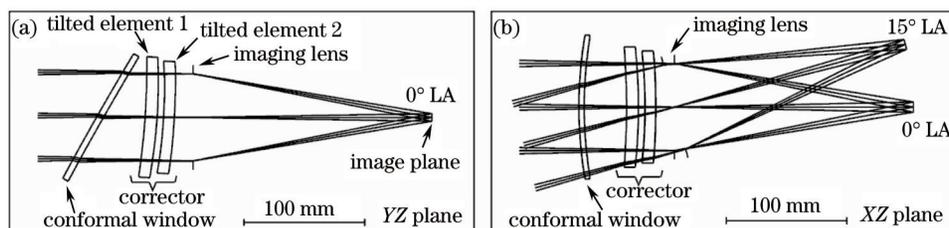


图 10 最终共形光学系统结构图。(a) YZ 平面内 0° 扫描视角的结构图; (b) XZ 平面内 0° 和 15° 扫描视角叠加的结构图

Fig.10 Layouts of final conformal optical system. (a) Layout for 0° LA in YZ plane; (b) layout for 0° LA and 15° LA in XZ plane

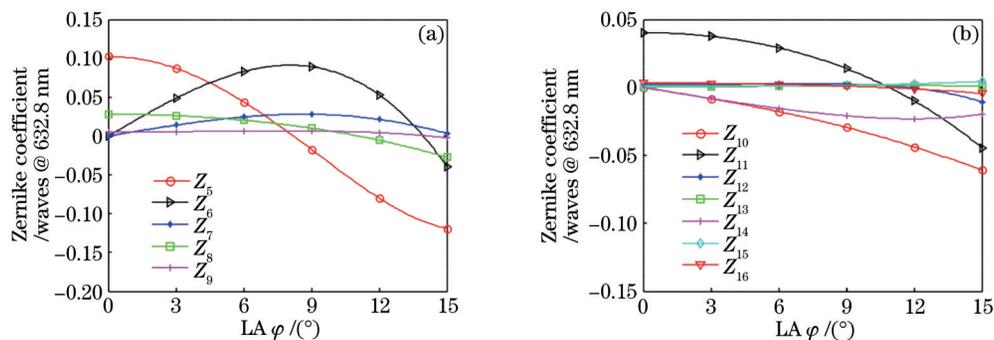


图 11 在各扫描视角最终共形光学系统残余的(a)三级像差和(b)五级像差

Fig.11 Residual (a) third order aberrations and (b) fifth order aberrations for final conformal optical system at different LAs

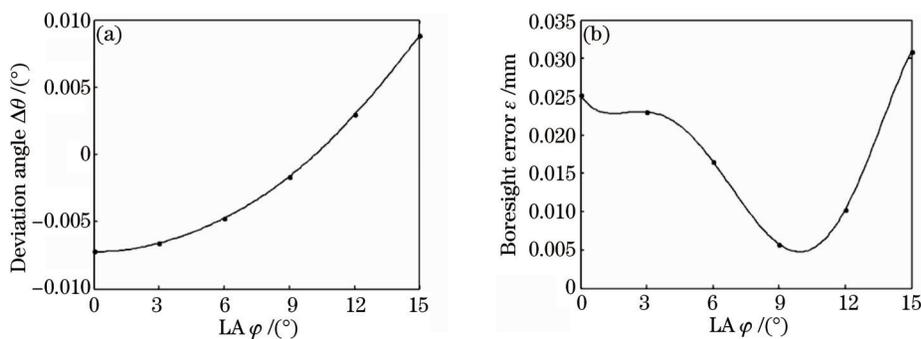


图 12 最终共形光学系统的(a)瞄视偏离角 $\Delta\theta$ 和(b)瞄视误差 ε

Fig.12 (a) Bore-sight deviation angle $\Delta\theta$ and (b) bore-sight error ε of the final conformal optical system

6 结 论

在建立共形窗口瞄视误差模型的基础上,依据瞄视误差的形成原因,提出利用倾斜光学元件实现共形窗口瞄视误差校正的光学途径。阐明了这一光学校正途径的原理,并通过设计实例证明了该光学校正途径的可行性。设计实例结果表明,通过将校正共形窗口像差的校正元件倾斜,能够实现共形窗口动态瞄视误差的校正,且不影响共形窗口像差的校正。因此,该光学校正途径不需要增加校正元件也不含有动态移动的校正元件。提出的基于倾斜光学元件的瞄视误差光学校正途径为飞机共形光学窗口的瞄视误差校正提供了一个参考方案。

参 考 文 献

- 1 Trotta P A. Precision conformal optics technology program[C]. SPIE, 2001, 4375: 96–107.
- 2 Thompson K P, Rodgers J M. Conformal optics: key issues in a developing technology[J]. Optics & Photonics News, 1997, 8(10): 24–30.
- 3 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.
- 4 Knapp D J. Fundamentals of conformal dome design[C]. SPIE, 2002, 4832: 394–409.
- 5 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.
- 6 Sun Jinxia, Sun Qiang, Li Dongxi, *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.
- 7 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.
- 8 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.

- 9 Wang Chao, Zhang Xin, Qu Hemeng, *et al.*. Design of novel catadioptric elliptical dome optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0822002.
王 超, 张 新, 曲贺盟, 等. 新型折反射式椭球形整流罩光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0822002.
- 10 Zhang Wang, Zuo Baojun, Chen Shouqian, *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.
- 11 Zhang Wang, Zuo Baojun, Chen Shouqian, *et al.*. Design of fixed correctors used in conformal Optical system based on diffractive optical elements[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(3): 461-466.
- 12 Wang Chao, Zhang Xin, Qu Hemeng, *et al.*. Sphere-cone-polynomial special window with good aberration characteristic[J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(7): 074212.
- 13 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.
- 14 Wang Chao, Jiang Huhai, Zhu Ruiwei, *et al.*. Boresight error analysis and correction of conformal infrared seeker[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912001.
王 超, 姜湖海, 朱瑞飞, 等. 共形光学导引头瞄视误差分析与修正[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912001.
- 15 Jiang Huhai, Wei Qun, Jia Hongguang, *et al.*. Analysis of angle increment error in conformal seeker and its feedforward compensation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 829-836.
姜湖海, 魏 群, 贾宏光, 等. 共形导引头角增量误差分析及其前馈补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 829-836.
- 16 Joseph R I, Thomas M E. Ray path deviation in a nonhemispherical dome[C]. *SPIE*, 2001, 4375: 160-170.
- 17 Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.*. Research on pulse echo characteristic of airborne laser detecting air target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0414001.
寇 添, 王海晏, 王 芳, 等. 机载激光探测空中目标脉冲回波特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0414001.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 Thompson K P. Aberration fields in tilted and decentered optical systems[D]. Arizona: University of Arizona, 1980.
- 21 Sasian J M. Imagery of the bilateral symmetric optical system[D]. Arizona: University of Arizona, 1988.
- 22 Crowther B G, McKenney D B, Mills J P. Aberrations of optical domes[C]. *SPIE*, 1998, 3482: 48-61.

栏目编辑: 史 敏