

基于计算成像的机载共形光学系统设计

袁睿, 赵春竹*, 郭玉, 句源, 朴明旭

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了校正机载共形光学窗口引入的随观察视角变化的动态像差, 提出基于计算成像的共形光学系统像差校正方法。通过建立非相干成像系统模型, 给出波前编码系统消除共形光学窗口动态像差的原理和成像过程, 阐明基于计算成像的共形光学系统的设计准则和掩模板的优化流程, 利用倾斜边缘法定量分析该系统的传递能力。实验结果表明, 通过计算成像的方法可以校正机载共形光学系统的动态像差, 并且无需加入复杂的校正器件, 该系统具有结构简单和稳定性强的优点。

关键词 光学设计; 共形光学; 光学窗口; 计算成像; 像差

中图分类号 O436 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.232201

Design of Airborne Conformal Optical System Based on Computational Imaging

Yuan Rui, Zhao Chunzhu*, Guo Yu, Ju Yuan, Piao Mingxu

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract To correct the dynamic aberrations introduced by an airborne conformal optical window that changes with viewing angle, a method for aberration correction of the conformal optical system based on computational imaging is proposed herein. By establishing an incoherent imaging system model, the principle and imaging process of the wavefront encoding system to eliminate the dynamic aberrations of the conformal optical window are given, and the design criteria of the conformal optical system based on computational imaging and the optimization process of the mask are clarified, and the transmission capability of the system is quantitatively analyzed by using the tilted edge method. Experimental results show that the dynamic aberration of the airborne conformal optical system can be corrected using the computational imaging method, and there is no need to add complex correctional devices, the system has the advantages of a simple structure and strong stability.

Key words optical design; conformal optics; optical windows; computational imaging; aberration

OCIS codes 220.4830; 110.1758

1 引言

机载共形光学窗口是指与飞机外形轮廓相吻合的光学窗口, 使用该窗口可以减小空气阻力^[1], 但因其具有特殊的面形则会引入大量的光学像差。由于飞机成像平台多使用扫描型光学系统, 因共形光学窗口引入的像差会随着扫描视角的变化呈现动态变

化, 为此科研学者先后提出校正几何光学像差的方法, 包括使用动态校正器^[2]、动态校正器与静态校正器结合^[3-4]以及内表面设计为自由曲面^[5]等。使用动态校正器或复杂结构的校正器都将会增加系统的复杂度, 降低稳定性。

计算成像技术是基于光学成像的理论和算法而设计的, 采用该技术可以校正像差, 降低光学系统的

收稿日期: 2020-04-02; **修回日期:** 2020-04-26; **录用日期:** 2020-04-30

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:** cz_zhao@sina.cn

复杂度,并且能够解决更多传统光学成像技术无法解决的问题。近年来,科研学者利用压缩感知成像技术可以实现无透镜全息成像,利用多层掩模板可以实现大视场显微成像^[6]。郑云达等^[7]提出了一种基于大视场简单光学系统的光学-算法协同设计方法,采用该方法可以得到优于分离设计的图像复原结果。

波前编码技术^[8]作为一种经典的计算成像技术,其通过引入掩模板来调制系统的点扩展函数(PSF),可以达到抑制像差以及获得接近衍射极限的理想图像的目的。波前编码技术的成像过程包括编码成像和图像复原两步,大量的科研学者专注于改进图像复原算法来提高波前编码系统的成像质量,其中赵惠等^[9]采用改进的去模糊算法获得了更好的视觉复原效果。

为了抑制机载共形光学窗口引入的像差,本文提出基于计算成像的共形光学系统像差校正方法。针对扫描型机载共形窗口的光学系统并根据像差随观察视角变化的特性,给出利用计算成像技术校正共形光学系统动态像差的一个设计实例,该实例仅使用一个掩模板和对应的图像重建算法,就可以实

现对共形光学窗口动态像差的校正。

2 基本原理

2.1 共形窗口像差特性分析

目前,共形窗口设计和制造的主要形状为双曲率面,其是最适合飞机应用的窗口面型,矢高方程可表示为

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

式中: z 为矢高; c_x 和 c_y 分别为 X 和 Y 方向的曲率,分别为曲率半径 R_x 和 R_y 的倒数; (x, y) 为窗口中点的坐标。

实验中引用文献^[10]给出的机载共形窗口参数及其后续光学系统参数。共形窗口光学系统如图1所示,机载光学系统参数如表1所示,其中 LA 为扫描角度, FOV 为视场角。共形窗口使用的材料为蓝宝石,厚度为5.08 mm,形状为双曲率面,子午和弧矢方向的曲率半径分别为2438.4 mm和2304.8 mm。系统在 $X-Z$ 平面上的扫描范围为 $-15^\circ \sim 15^\circ$,因窗口关于 $X-Z$ 平面对称,所以只考虑 $0^\circ \sim 15^\circ$ 的扫描范围即可。

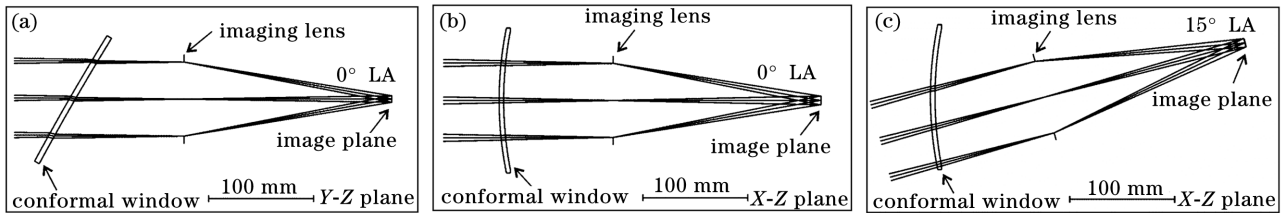


图1 共形窗口光学系统在不同情况下的示意图。(a)Y-Z平面上的 0° 扫描角;(b)X-Z平面上的 0° 扫描角;(c)X-Z平面上的 15° 扫描角

Fig. 1 Schematic of conformal window optical system under different conditions. (a) 0° scan angle in Y-Z plane; (b) 0° scan angle in X-Z plane; (c) 15° scan angle in X-Z plane

表1 共形窗口光学系统的参数

Table 1 Parameters of conformal window optical system

Parameter	Value
Focal length/mm	200
F number	2.8
FOV/ $[(^\circ) \times (^\circ)]$	2.4×1.8
FOV in X axis/ $(^\circ)$	± 15
FOV in Y axis/ $(^\circ)$	0
Wavelength range/nm	520-570

将共形窗口光学系统出瞳处的波前误差拟合合成Zernike多项式,得到该共形窗口引入像差随观察视

角的变化曲线,如图2所示,其中 $Z_2 \sim Z_9$ 为

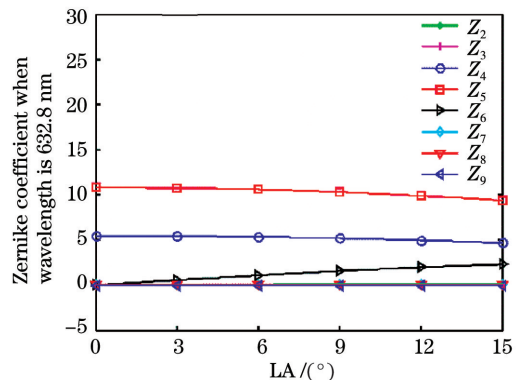


图2 像差随观察视角的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of aberration with LA

Zernike 多项式的系数。从图 2 可以看到,像散是共形光学窗口引入的主要像差之一,另外系统在实际情况下还引入离焦,但离焦不是真正的像差,其大小取决于成像位置。

2.2 共形光学系统波前编码的原理

将共形窗口光学系统作为非相干成像系统,基于傅立叶光学理论的成像公式可以表示为

$$I(x, y) = k \iint_{\Omega} O(x_0, y_0) h(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0, \quad (2)$$

式中: $I(x, y)$ 为像在 (x, y) 点的强度分布; $O(x_0, y_0)$ 为物体在 (x_0, y_0) 点的强度分布; $h(\cdot)$ 为光强脉冲响应函数,又称 PSF; Ω 为积分区域; k 为波矢标量值。(2)式又可写为

$$I(x, y) = O(x, y) * h(x, y), \quad (3)$$

式中: $*$ 为卷积符号。PSF 可以用来描述光学系统对物面上一个点光源的效应,即在像平面产生的光强分布。对于常见的几何光学系统,一般均认为符合(2)式,即空间不变系统。一些光学系统对物面上任意两点的响应都不同,但在每个扫描视场内,由于视场角很小,即 $2.4^\circ \times 1.8^\circ$,所以不考虑空间变化系统的效应,即认为 PSF 在同一个扫描视场内的各个位置均是一致的。

对于一般的光学系统,存在的各种像差会使像点聚焦的能力变差,原因在于系统有透镜缺陷或者空气波动等使出瞳上的出射波偏离理想球面,从而导致像质变差。基于傅里叶光学的成像理论,可以将 $h(x, y)$ 写为

$$h(x, y) = | \mathcal{F}\{P(\xi, \eta)\} |^2, \quad (4)$$

式中: $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 为傅里叶变换; $P(\xi, \eta)$ 为系统广义光瞳函数; (ξ, η) 为光瞳面的归一化坐标,即 $|\xi| < 1, |\eta| < 1$ 。

分析(4)式可知,对于任意的空间位移不变光学系统,其对像的响应均由广义光瞳函数决定。广义光瞳函数不仅可以表征系统对波前振幅的调制作用,同时也可以表征波前的相位变化,相位变化从概念上可看作在光波传播的过程中产生的光程差。将广义光瞳函数展开,可以写为

$$P(\xi, \eta) = P_0(\xi, \eta) \exp [jkW(\xi, \eta)], \quad (5)$$

式中: $P_0(\xi, \eta)$ 为系统孔径的尺寸,一般由光阑决定; $W(\xi, \eta)$ 为实际波面偏离理想球面的光程差。

波前编码系统的原理是在系统光阑的位置上添加一块可以改变波前相位的掩模板,由于掩模板在光阑处,则相位的改变量可以直接体现广义光瞳函

数中的 $W(\xi, \eta)$ 。实验过程中,掩模板的类型均为 Dowski 等^[8]使用的三次掩模板,三次掩模板函数可表示为

$$\varphi(\xi, \eta) = a(\xi^3 + \eta^3) + b(\xi^2\eta + \xi\eta^2), \quad (6)$$

式中: a, b 为掩模板的参数,可作为优化变量。

综上所述,共形窗口光学系统的像差主要为像散,所以该系统的广义光瞳函数可以表示为

$$P(\xi, \eta) = P_0(\xi, \eta) \exp [jkW_{22}(\xi \cos \theta + \eta \sin \theta)^2], \quad (7)$$

式中: W_{22} 为像散系数; θ 为沿光瞳面坐标的像散方向角。在共形窗口光学系统中加入掩模板后,可以得到系统的广义光瞳函数,表达式为

$$P(\xi, \eta) = P_0(\xi, \eta) \exp [jk\varphi(\xi, \eta) + jkW_{22}(\xi \cos \theta + \eta \sin \theta)^2], \quad (8)$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 为三次掩模板的相位函数。波前编码系统的核心是通过添加掩模板来引入远大于系统本身的像差,从而调制系统的 PSF,使其只与掩模板的参数相关,再采用图像重建算法恢复图像。由(6)式可知,通过合理地设计参数 a, b 就可以使二次函数的像散远小于三次掩模板函数,从而抑制像散。

2.3 系统设计准则、流程及评价方法

所提系统的设计过程主要分为共形窗口光学系统的建模和掩模板参数的优化两部分。具体过程:在光学设计软件 Zemax 中对初始共形窗口光学系统进行建模,并在窗口后加入一个平行平板;再利用 MATLAB 数据服务器 MZDDE 来提取系统在不同视场中的 PSF,设计基于共形光学窗口系统的掩模板优化准则,并编写 MATLAB 中的粒子群优化函数以优化 Zemax 软件中的掩模板参数,流程如图 3 所示。

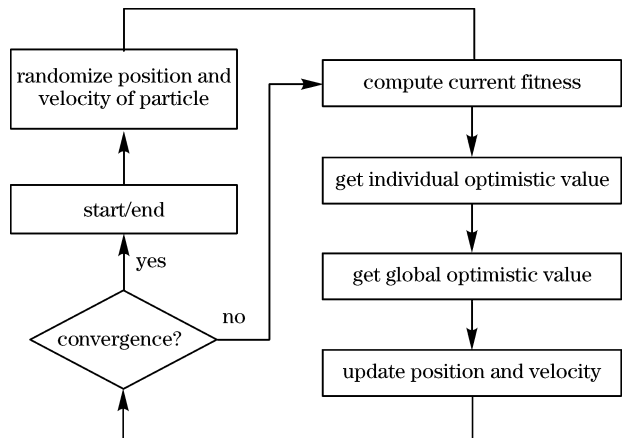


图 3 粒子群优化算法的流程

Fig. 3 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

掩模板的优化结果必须满足不同扫描视角的 PSF 均趋于一致,即优化结果不随共形窗口动态像差的变化而变化。满足上述条件后,就可以利用单一观察角度的 PSF 来恢复全部观察角度的图像。基于上述分析,基于波前编码的共形窗口系统中掩模板的优化准则可以表示为

$$\begin{cases} M_{MF} = \frac{\sum_n \sum_i \sum_j \frac{STD[(F_{PSF_n})_{i,j}]}{(T_{PSF})_{i,j}}}{U \cdot V}, & (9) \\ \int_{\Omega} F_{MTF} df > T \end{cases}$$

式中: M_{MF} 为目标优化变量; F_{PSF_n} 为第 n 个视场的 PSF; T_{PSF} 为实验设计的共形光学系统在 0° 观察视角的 PSF; $STD[(F_{PSF_n})_{i,j}]$ 为在第 i 行、第 j 列像素点处第 n 个视场的 PSF 与 T_{PSF} 的差值; T 表示 MTF 积分面积的最小值,其可以满足一定的可复原条件。

将(8)式作为适应度函数,采用粒子群优化算法可以实现对掩模板参数的优化,使得系统在各个扫

描视场中的 PSF 趋于一致。

基于波前编码系统的两步成像过程,当设计系统时,系统的传递能力不能使用一般的光学设计软件来评价,需要采用其他方法来计算系统的调制传递函数或者空间频率响应。工业中计算实际光学系统 MTF 的方法很多,比如使用分辨率板、PSF 法和倾斜边缘法^[11]。其中倾斜边缘法是较为常用的方法之一,通过获得倾斜边缘的响应函数来计算线扩展函数,最后得到系统的空间频率响应,实验过程中引入倾斜边缘法并作为波前编码系统的评价方法^[12]。

3 结果分析与比较

为了研究波前编码共形光学系统,系统中的成像透镜使用 Zemax 软件中的近轴面来代替,以减少由其他像差带来的影响。设计的光学系统由共形窗口、掩模板和理想成像透镜组成,结构如图 4 所示。表 2 为系统优化后的三次掩模板参数、掩模板到成像透镜的距离和 M_{MF} ,优化前的 M_{MF} 值为 5×10^{-2} 。

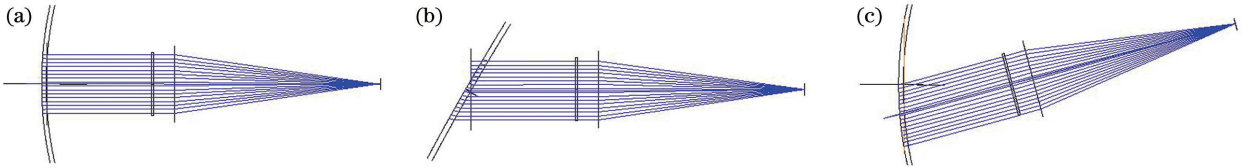


图 4 波前编码共形光学系统示意图。(a) X-Z 平面上的 0° 视角;(b) Y-Z 平面上的 0° 视角;(c) X-Z 平面上的 15° 视角
Fig. 4 Schematic of wavefront encoding conformal optical system. (a) 0° viewing angle on X-Z plane; (b) 0° viewing angle on Y-Z plane; (c) 15° viewing angle on X-Z plane

表 2 掩模板的参数优化结果

Table 2 Parameter optimization results of mask

Parameter	Optimized value
a	2.266×10^{-3}
b	-9.496×10^{-3}
Distance/mm	48.578
M_{MF}	7×10^{-3}

对比掩模板优化前后各扫描视角的 PSF,如图 5 和图 6 所示,其中图 5 为仅含有共形光学窗口和一个理想透镜在 6 个扫描视角下的 PSF,图 6 为加入掩模板并优化其参数后在 6 个扫描视角下的 PSF。从图 5 和图 6 可以看到,加入掩模板的共形光学系统,即波前编码共形光学系统可以有效减小成像系统对点对象的响应。

使用 Zemax 和 MATLAB 软件来模拟波前编码系统的成像过程。仿真图像的尺寸为

2048 pixel \times 2048 pixel,像素在实际空间中的间隔为 $0.188 \mu\text{m}$,为了统一像面空间的采样间隔,对

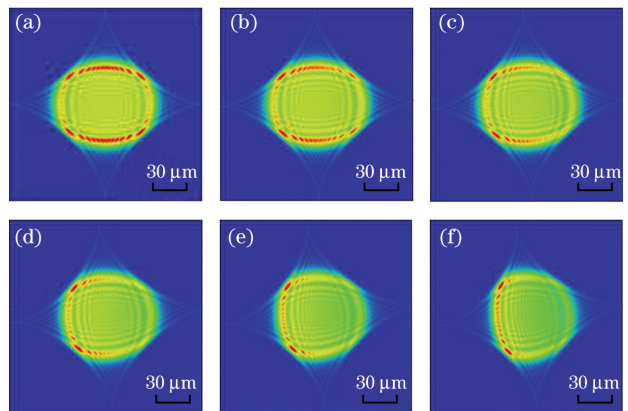


图 5 在不同扫描视角下优化前的 PSF 图。(a) 0° ;(b) 3° ;(c) 6° ;(d) 9° ;(e) 12° ;(f) 15°
Fig. 5 PSF images before optimization under different scan angles. (a) 0° ; (b) 3° ; (c) 6° ; (d) 9° ; (e) 12° ; (f) 15°

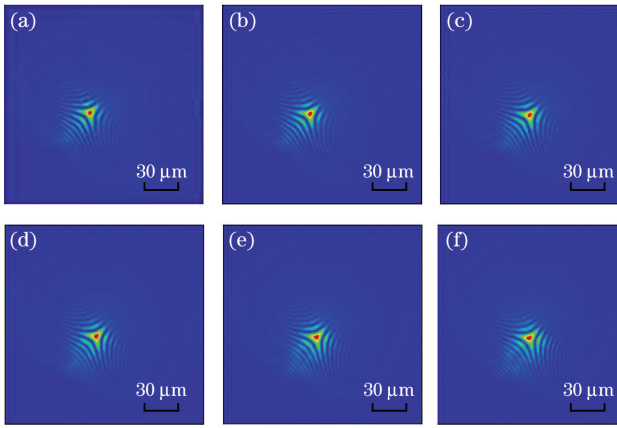


图 6 在不同扫描视角下优化后的 PSF 图。(a) 0°; (b) 3°; (c) 6°; (d) 9°; (e) 12°; (f) 15°

Fig. 6 PSF images after optimization under different scan angles. (a) 0°; (b) 3°; (c) 6°; (d) 9°; (e) 12°; (f) 15°

PSF 进行 8 倍采样, 最终间隔为 1.5 μm, 由 PSF 采样而导致的振铃现象并不明显。仿真过程中使用的图像尺寸均为 2048 pixel × 2048 pixel, 如果有图像尺寸小于此要求, 则采用填充边界的方法。

系统图像的仿真结果如图 7 所示。从图 7 可以看到, 图像细节得到了很好的保存。维纳滤波重建的过程中, 能量的平均化会导致较大观察视角的图像对比度降低, 因此视觉效果较差。视觉效果可以通过后续的图像处理来提升, 而对比度的降低并不会影响所设计的系统对高频信息的传递。



图 7 Lena 图像在不同扫描视角下的仿真结果。(a) 原始图像; (b) 0°; (c) 3°; (d) 6°; (e) 9°; (f) 12°; (g) 15°

Fig. 7 Simulation results of Lena images under different scan angles. (a) Original image; (b) 0°; (c) 3°; (d) 6°; (e) 9°; (f) 12°; (g) 15°

图 8 为文献[13]利用了静态光学元件来校正共形窗口像差设计的 MTF 曲线。从图 8 可以看到, 当系统的频率为 50 lines/mm 时, MTF 系数仍然达到 0.85 以上, 接近衍射极限。图 9 为所设计系统的空间频率响应曲线, 其中 SFR 为空间频率分辨率。从图 9 可以看到, 当系统的频率为 50 lines/mm 时, 扫描视场角在 0°~12°之间的调制度均保持在 0.80 以上, 当扫描视场角为 15°时, 最大频率处的调制度降到 0.75, 但仍能保持较好的高频信息传递能力。相比于静态校正元件, 通过计算成像方法来校正动态像差可以省去多片倾斜且复杂面形的元件, 仅通过一个掩模板就可以实现像差的校正, 简化系统的复杂度, 增加系统的稳定性。

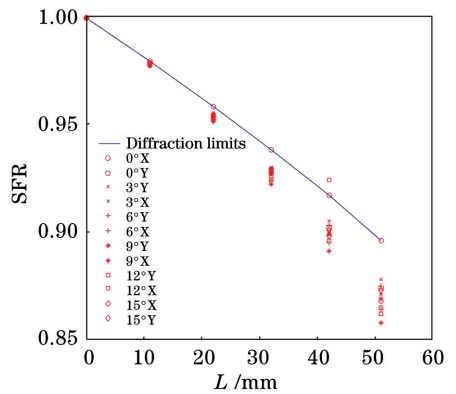


图 8 静态校正方法在不同 FOV 下的 MTF 曲线^[13]

Fig. 8 MTF curves of static correction method under different FOV^[13]

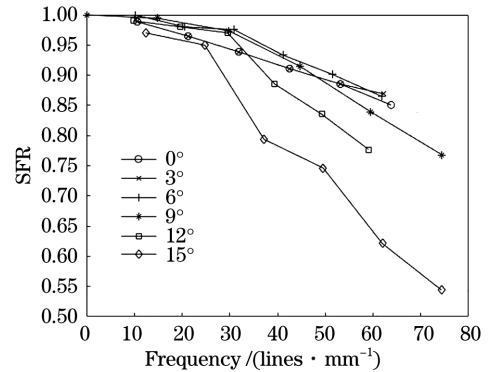


图 9 所提方法在各 FOV 下的 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curves of proposed method in each FOV

4 结 论

本课题组给出基于计算成像技术的机载共形窗口光学系统设计方法。在分析共形窗口像差和波前编码原理的基础上, 理论上证明该方法可以校正机载共形窗口引入的动态像差。采用粒子群算法可以实现对波前编码共形光学系统中掩模板参数的优

化。通过对比优化前后的点扩展函数,以及最终图像重建的空间频率传递能力,证明所提方法可以有效校正机载共形窗口的像差,提高共形光学系统的像质。通过与传统几何光学系统对比,波前编码共形光学系统的传递能力和前者差距很小,光学结构简单可靠,稳定性强。波前编码系统对于一些影响像差的因素,如热变形和瞄视误差等具有一定的不敏感性,使其更利于在飞机应用平台上使用。同时所提系统通过计算成像的方法来校正像差,因此点扩展函数可以在掩模板加工后依据实际的加工装调参数来获得数据,因此加工装调误差不会影响后续图像复原效果。

参 考 文 献

- [1] Trotta P A. Precision conformal optics technology program [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4375: 96-107.
- [2] Kunick J M, Chen C W, Cook L G, et al. Dynamic aberration corrector for conformal windows: US5526181 [P/OL]. 1996-06-11 [2020-04-19]. <https://patents.justia.com/patent/5526181>.
- [3] Morgan D J, Cook L. Conformal window design with static and dynamic aberration correction: US6018424 [P/OL]. 2000-01-25 [2020-04-19]. <https://patents.justia.com/patent/6018424>.
- [4] Chen C W. Optical system with two-stage aberration correction: US6091548 [P/OL]. 2000-07-18 [2020-04-19]. <https://patents.justia.com/patent/6091548>.
- [5] 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.
- [6] Zhang H, Cao L C, Jin G F, et al. Progress on lensless digital holography imaging based on compressive holographic algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 080001.
- 张华, 曹良才, 金国藩, 等. 基于压缩感知算法的无透镜数字全息成像研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 080001.
- [7] Zheng Y D, Huang W, Xu M F, et al. Optical/algorithmic co-design of large-field high-quality simple optical system [J]. Chinese Optics, 2019, 12(5): 1090-1099.
郑云达, 黄玮, 徐明飞, 等. 大视场高像质简单光学系统的光学-算法协同设计[J]. 中国光学, 2019, 12(5): 1090-1099.
- [8] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding [J]. Applied Optics, 1995, 34(11): 1859-1866.
- [9] Zhao H, Xia J J, Zhang L, et al. Experimental studies on improved vector extrapolation Richardson-Lucy algorithm used to realize wave-front coded imaging [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(6): 0611003.
赵惠, 夏晶晶, 张凌, 等. 改进矢量外推 Richardson-Lucy 算法在波前编码图像复原中的应用[J]. 光子学报, 2019, 48(6): 0611003.
- [10] 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.
- [11] Burns P D, Williams D. Refined slanted-edge measurement for practical camera and scanner testing [C] // IS & T' s PICS Conference, April 2002, Portland, Oregon, USA. [S.l.:s.n.], 2002: 191-195.
- [12] Scrymgeour D, Boye R, Adelsberger K. Advanced imaging optics utilizing wavefront coding [R]. Albuquerque: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2015.
- [13] 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.