基于 Zernike 模型系数优化的椭球型窗口光学系统像差校正*

梁殿明[1)] 王超[1)2)†] 史浩东[1)] 刘壮[1)] 付强[1)] 张肃[1)]
战俊彤[1)] 余益欣[3)] 李英超[1)] 姜会林[1)]

1) (长春理工大学, 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 长春 130022)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

3) (长春理工大学理学院, 长春 130022)

(2020 年 6 月 17 日收到; 2020 年 7 月 28 日收到修改稿)

传统的半球形窗口难以满足高速飞行器气动力学的需求, 采用流线型外表面的非球面光学窗口技术应运而生. 这种窗口会随着扫描视场角的变化产生大量动态像差, 校正这类像差成为高速飞行器光电成像系统发展的关键问题. 对于扫描视场为±60°的椭球形窗口光学系统, 研究了静态校正和无波前探测器的自适应光学技术相结合的大扫描视场像差校正方法. 设计时, 首先以减少系统像差种类为导向, 进行初始结构设计, 消除五阶 Zernike 像差, 从而减少后续自适应优化控制变量数. 利用 Zernike 多项式系数与变形镜驱动器电压之间的转换矩阵, 将优化变量由 140 个驱动器电压减少至 Zernike 多项式 2—9 项系数. 最后利用基于 Zernike 模型的遗传算法对变形镜面形进行控制, 校正残余像差. 仿真结果表明, 各典型扫描视场点的优化速度提升 95% 以上, 且光学像质接近衍射极限. 该优化方法不仅可以修正异形光学窗口引起的像差, 同时还能够校正光学系统装调、加工时引起的误差, 具有较强的实用性.

关键词: 非球面窗口, Zernike 多项式, 变形镜, 遗传算法

PACS: 42.15.Fr, 42.15.Eq, 85.85.+j, 78.20.Bh **DOI:** 10.7498/aps.69.20200933

1 引 言

传统的飞行器窗口元件一般为半球形, 成像系统的旋转中心与球面中心重合, 扫描过程产生的像差是恒定的, 且设计和加工的难度低, 技术成熟[1]. 但这种半球形窗口的空气阻力系数较大, 难以满足高速飞行的需求[2−4]. 由于目前对飞行器的速度要求越来越高, 通常采用更符合空气动力学性能的非球面窗口来代替传统的球面和平板窗口, 一般是二次曲面, 多为椭球面[5,6]. 但是随着扫描视场角的变化, 这种椭球形窗口会给后方成像系统带来动态变化的像差[7], 校正这种像差是特殊形状窗口光学系统发展中必须解决的关键问题.

目前特殊形状窗口光学系统像差的校正方式繁多, 主要分为静态[8,9]、动态[10]和静态-动态结合[11−14]三种. 由于视场越大, 像差波动幅度也越大, 因而大扫描视场下往往采用校正能力最强的动

* 国家自然科学基金 (批准号: 61805028, 61805027, 61705019, 61701045, 61890960)、科工局专项 (批准号: KJSP2016010202)、国家自然基金天文联合基金 (批准号: U1731240)、吉林省教育厅基金 (批准号: JJKH20190563KJ)、吉林省自然科学基金 (批准号: 20180101338JC) 和应用光学国家重点实验室开放基金 (批准号: SKLA02020001A11) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: Nicklo19992009@163.com

© 2020 中国物理学会 Chinese Physical Society

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

态-静态结合法. 该方法的主要途径是先通过固定校正元件来将像差降低到较低的波动水平, 再通过行程较小但变化灵活的动态像差发生器校正残差. 以往的研究利用这种方法取得了优良的像质, 但其中的固定校正器和动态像差发生器往往独立设计, 动态校正器的控制方式也通常采用直接控制法, 特点是控制变量较多, 优化时间较长. 因此, 仍需进一步探索新型静态-动态结合的波前误差校正机理, 结合椭球形窗口的像差特性, 优化控制模型的构成[15], 从而迅速有效地校正超大扫描视场椭球窗口光学系统的像差.

首先对椭球型光学窗口进行像差特性分析和有针对性的 Zernike 像差项校正. 然后围绕光学窗口的像差特点和像质评价标准构建基于 Zernikes 模型的遗传算法流程, 减少优化变量个数. 最后利用遗传算法进行优化, 以斯特列尔比作为遗传算法的适应度函数, 分析不同优化变量下的算法收敛速度, 给出最优校正策略. 此种方法不仅有利于椭球形窗口光学像质最优化, 而且在实际自适应光学模块中运行时, 具有基于模型的优化方法特有的运算效率高的优点.

2 椭球形窗口像差分析及初步校正

2.1 椭球形窗口像差分析

本文采用氟化镁作为椭球形窗口的材料, 该窗口的最大口径为 100 mm, 厚度为 4 mm, 长径比[16,17] 为 1.0. 窗口后的成像系统扫描视场角度为 ± 60°. 以光阑中心作为窗口旋转的节点, 旋转步进角 5°, 工作波段为中波红外, F 数为 1.5, 入瞳直径为 30 mm. 为了获得视场范围内窗口像差分布, 将一理想成像系统放在光阑处代替实际观测系统. 椭球形窗口和实际观测系统的示意图如图 1 所示.

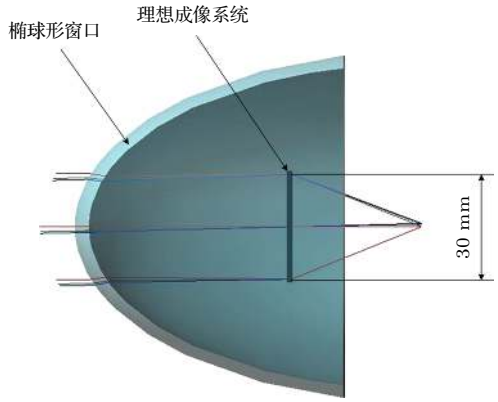

图 1 椭球形窗口和观测系统的示意图

Fig. 1. Schematic diagram of ellipsoid window and observation system.

Zernike 多项式是在单位圆内部连续正交的无穷项的多项式完全集, 其与赛德尔像差项具有对应性, 因此采用 Zernike 多项式来表示椭球形窗口的光学像差. 用 Zernike 多项式对不同视场角下的椭球形窗口光学系统进行波面拟合, 各项系数随扫描视场的变化如图 2 所示.

可以看出, 当扫描视场角增大时对像质影响较大的有: 离焦 (Z_4)、三阶像散 (Z_6)、三阶彗差 (Z_7, Z_8) 和三叶草像差 (Z_{10}, Z_{11}). 其中三阶像差占主导地位.

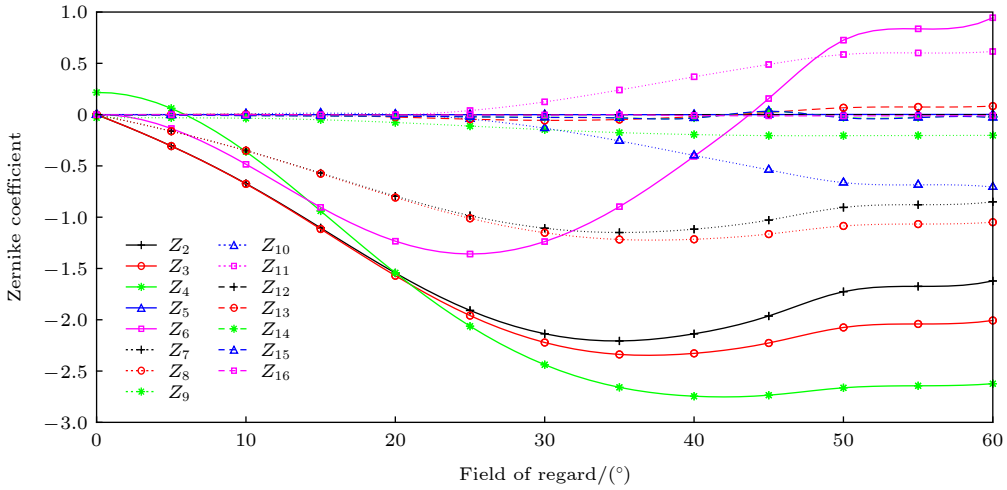

图 2 Zernike 系数随视场变化

Fig. 2. Variation of Zernike coefficients with field of view.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2 椭球形窗口像差初步校正

通常由 Zernike 多项式前 16 项可完备表达一个复杂光学系统的波前误差[18], 但本文中多项式的项数直接关系到自适应优化的变量数, 且 Zernike 多项式各项之间相互正交, 难以互相补偿, 因此需要在进行像差初始校正的时候尽量减少像差种类. 本文中, 在设计初始结构进行像差校正时, 以降低三阶像差和基本消除五阶像差为导向.

在设计过程中, 除常规的缩小焦面点斑直径的评价函数外, 特别增加 Zernike 多项式 10—16 项对应的五阶像差项的约束条件. 利用光学设计软件 Code V 中自带的宏程序 fifthdef.seq, 计算各类五阶像差, 包括 Z_{10}, Z_{11}(三叶草像差, 也叫五阶椭圆彗差), Z_{12}, Z_{13}(五阶像散), Z_{14}, Z_{15}(五阶彗差)、Z_{16}(五阶球差). 并在评价函数中引用以上像差值, 所有五阶像差的约束目标设为 0, 约束权重提高为 20 (正常为 1). 这样在优化过程中可将 Zernike 多项式 10—16 项对应的波像差均方根 (RMS) 误差降低至 0.02λ @4250 nm (λ 为波长), 各项五阶像差幅度已接近 0, 从而减少后续遗传算法优化变量.

优化后的光学系统光路图如图 3 所示. 图中最前方为 MgF_2 材料的椭球形窗口, 口径 100 mm; 窗口后方为非球面固定校正板, 其后的成像系统采用折反式的结构, 以缩短整个系统的光学筒长; 折反系统的主反射镜面形为二次曲面; 中继透镜组包含三片球面镜, 材料分别是硅、锗、硅. 从椭球型头罩外表面到像面的系统总长为 62.30 mm, 结构较为紧凑.

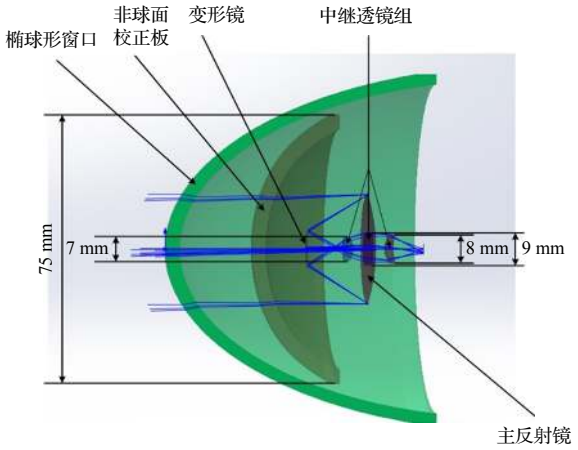

图 3 椭球形窗口光学系统光路图

Fig. 3. Optical path diagram of ellipsoid window optical system.

优化完成后, Zernike 各项系数如图 4 所示. 可以看出, Z_2—Z_9 代表的一阶和三阶像差项得到控制 (各项 RMS 误差 $< 0.2\lambda$), Z_{10}—Z_{16} 代表的五阶像差基本被消除 (RMS 误差 $< 0.02\lambda$). 全系统斯特列尔比由 0.04 提升至 0.33. 这样后续在仿真优化时可以只优化 Zernike 系数前 9 项, 从而提高优化效率.

3 基于较少项 Zernike 模式系数的遗传算法像差优化方法

3.1 自适应像差发生器

本文利用自适应光学技术校正椭球型窗口的残余像差. 自适应光学系统可分为有波前探测器和无波前探测器两种, 无波前探测器自适应系统一般以光电器件上远场光强信号的强弱作为判定被补

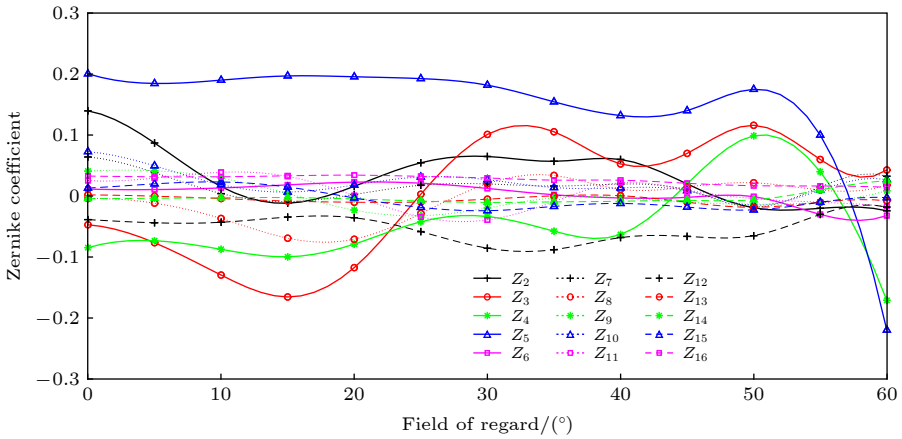

图 4 优化后 Zernike 系数随视场变化

Fig. 4. Variation of Zernike coefficients with field of view after optimization.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

偿系统像差校正情况的标准, 其不需哈特曼传感器, 结构相对简单, 成本较低, 近年来得到广泛的应用. 由于椭球型窗口光学系统应用于飞行器平台, 对系统有结构简单、体积小、重量轻等要求, 拟使用无波前探测器的自适应系统.

所用的自适应像差发生器为可变形反射镜, 其可以通过改变面形, 产生和波前像差相共轭的光学像差[19]. 文中所用的是 140 单元的微机械 (MEMS) 变形镜. 图 5 为 140 个驱动器的排布情况, 变形镜内接圆直径为 9.6 mm, 与第 2 节光学系统折反射部分的次镜通光口径相等.

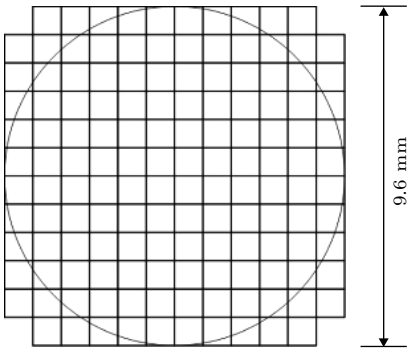

图 5 变形镜驱动器排布

Fig. 5. Actuator arrangement of deformable mirror.

3.2 基于 Zernike 模式系数优化的遗传算法

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的全局优化方法. 相较于传统算法, 可以同时处理种群中的多个个体, 即对多个解进行评估, 从而有效地避免陷入局部最小值.

在一般的自适应变形镜系统中, 通常直接控制驱动器的电压以调制波前, 驱动器个数越多, 波前表达也越精确. 根据变形镜的特性, 一般将驱动电压作为遗传算法优化的变量. 由于本文采用的是 140 单元变形镜, 变量过多, 将直接导致算法的优化速度大大降低. 因此根据椭球形光学窗口像差特性, 本文将波前像差分解得到的各项 Zernike 多项式系数作为种群中的个体, 仅控制少量的 Zernike 模式系数进行优化.

在遗传算法中, 判断种群中个体优劣程度的依据是适应度函数[20]. 本文将光学系统的斯特列尔比 (SR) 作为遗传算法的适应度函数, 斯特列尔比的定义为轴上点实际峰值光强和轴上点理想峰值光强的比值. 斯特列尔比越接近 1 说明实际与理想光强越接近, 即像质越好.

用遗传算法进行优化时, 计算种群中的个体经过选择、交叉、变异后的一代代种群的适应度值, 最终得到适应度函数值达到设定目标时种群中的个体, 即斯特列尔比达到预定值时的 Zernike 各项系数. 工作流程如图 6 所示.

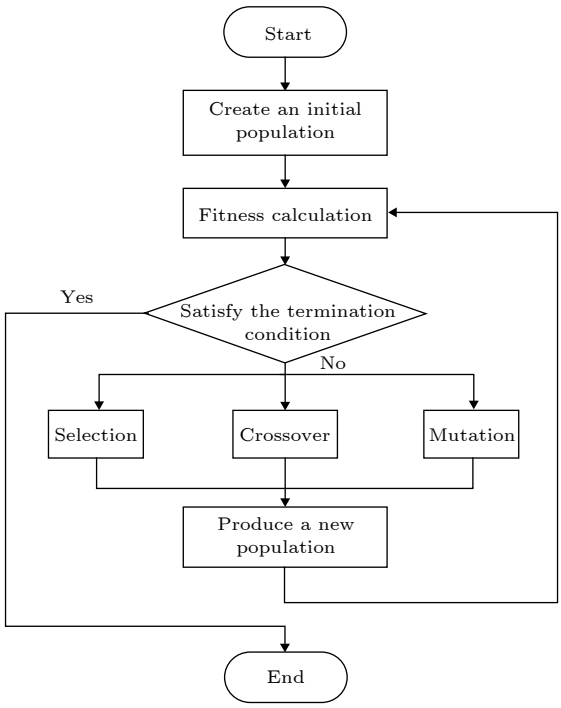

图 6 遗传算法流程图

Fig. 6. Flow chart of genetic algorithm.

得到 Zernike 各项系数后, 需要将其转换为变形镜驱动器电压进而控制变形镜产生相应面形.

变形镜所有单元发生的不同形变叠加在一起, 产生的面形变化 $\varphi(x,y)$ 为

$$\varphi(x,y)=\sum_{i=1}^{n} v_i W_i(x,y), \tag{1}$$

式中, n 是变形镜所包含的驱动器个数, v_i 为变形镜的第 i 个驱动器的控制电压, $W_i(x,y)$ 是对变形镜第 i 个驱动器上施加单位控制电压后的面形影响函数.

一般可由下面的高斯函数近似表示变形镜的面形影响函数[21]:

$$W_i(x,y)=\exp\left\{\ln\omega\left[\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}\Big/d\right]^{\alpha}\right\}, \tag{2}$$

式中, (x_i, y_i) 表示变形镜的第 i 个驱动器的位置, d 是变形镜相邻驱动器之间的间距, α 是高斯函数

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

指数, ω 是变形镜驱动器的交连值. 交连值的定义是: 某驱动器相邻的驱动器的中心形变量与该驱动器工作时的中心最大形变量的比值. 本文中, 根据所用驱动器的间距, d 取 0.8 mm. 通常变形镜的交连值为 5%—15%, 高斯指数为 1.5—3.5[22]. 此处取中间值, $\omega = 0.06$, $\alpha = 2.0$.

Zernike 多项式在单位圆内具有连续正交的性质, 可以用前 m 项 Zernike 多项式来表示波前信息[23], 在 m 个 Zernike 多项式系数和 n 个变形镜驱动器电压之间建立 $n \times m$ 阶的转换矩阵 $\boldsymbol{A}$[24]. 则 Zernike 系数和驱动器电压间的转换关系可表示为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2m} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix}, \tag{3}$$

简写为

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{AC}, \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{V}$ 为驱动器电压矩阵, $\boldsymbol{C}$ 为 Zernike 系数矩阵. 此时算法的优化变量数从 140 项减少为 Zernike 多项式的项数, 且优化完成后仅需一步矩阵乘法, 用矩阵 $\boldsymbol{A}$ 乘以输出的 Zernike 多项式系数, 便可获得变形镜各驱动器控制电压, 使得整体运算速度大大提高.

4 仿真优化及结果分析

在 Code V 中建立含变形镜的光学系统, 并在 MATLAB 中通过上述基于模型的遗传算法, 间接地控制每一个驱动器电压以进行像差补偿. 通过基于 Windows 组件对象模型 (COM) 的 ActiveX 技术, 建立 MATLAB 与 Code V 之间的通信. 在每个迭代周期中, MATLAB 将计算出的一组数据发送到 Code V; Code V 根据接收到的数据改变变形镜的形状, 并计算 SR, 再将其发送回 MATLAB. 不断进行迭代, 直到满足终止条件.

本文所用遗传算法的适应度函数将向着 SR 增大的方向进行优化. 根据斯特列尔准则, 当 $SR \geqslant 0.8$ 时, 认为光学系统的成像质量是完善的. 根据本文所用光学系统实际情况, 当 $SR = 0.7$ 时像质已达到接近衍射极限水平, 满足飞行器光电载荷使用需求, 为节省优化时间, 将 $SR = 0.7$ 作为终止条件.

运行遗传算法, 进行三种情况对比, 对初始系统在视场角从 0°到 60°的不同变焦位置进行优化. 分别将 2—9 项 Zernike 模式系数、2—16 项 Zernike 模式系数和 140 个驱动器电压作为算法变量, 初始种群设置为 0, 然后在种群内增加扰动, 进行选择、交叉和变异获得新一代种群, 循环直到某一代种群的适应度函数值达到终止条件, 即斯特列尔比达到 0.7. 统计不同变量下算法达到终止条件所进行的优化代数. 结果如图 7 所示.

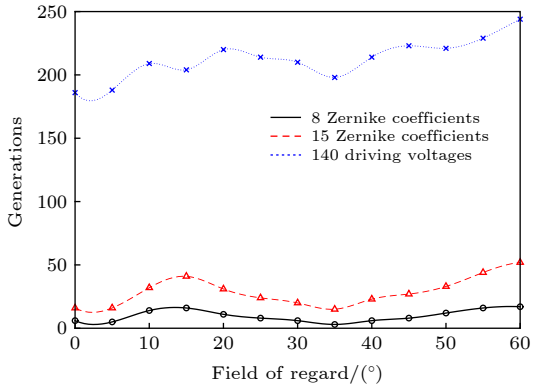

图 7 不同变量下的优化代数

Fig. 7. Optimization generations with different variables.

根据图 7 可以看出, 三种优化方式都能够收敛于 $SR = 0.7$. 140 个驱动器电压作为变量时优化代数远远超过基于 Zernike 模式系数的优化代数. 对于实验中使用的工控机, 算法运行 1 代所用时间约为 1 min. 优化 15 项 Zernike 系数与优化 140 个驱动电压相比, 各扫描视场点的平均优化时间由 212.3 min 减少到 28.8 min, 减少了 80% 以上. 如 2.2 节中所述, 10—16 项 Zernike 系数可事先利用初始像差校正手段进行抑制, 因此可以采取优化 8 项 Zernike 模式系数的策略, 最大限度的提高优化速度. 8 项 Zernike 模式系数作为优化变量与 15 项 Zernike 模式系数作为优化变量相比, 13 个扫描视场点的平均优化时间由 28.8 min 减少到 9.8 min, 后者仅为前者的 40%. 最终优化变量定为 8 项 Zernike 系数, 与优化 140 个驱动电压相比, 各扫描视场点的平均优化时间减少了 95% 以上.

图 8 是优化完成后系统在 0°—60°各个典型扫描视场点的 MTF 曲线, 均接近衍射极限, 说明所使用的基于 Zernike 模型的遗传优化方法取得了良好的像差补偿效果.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

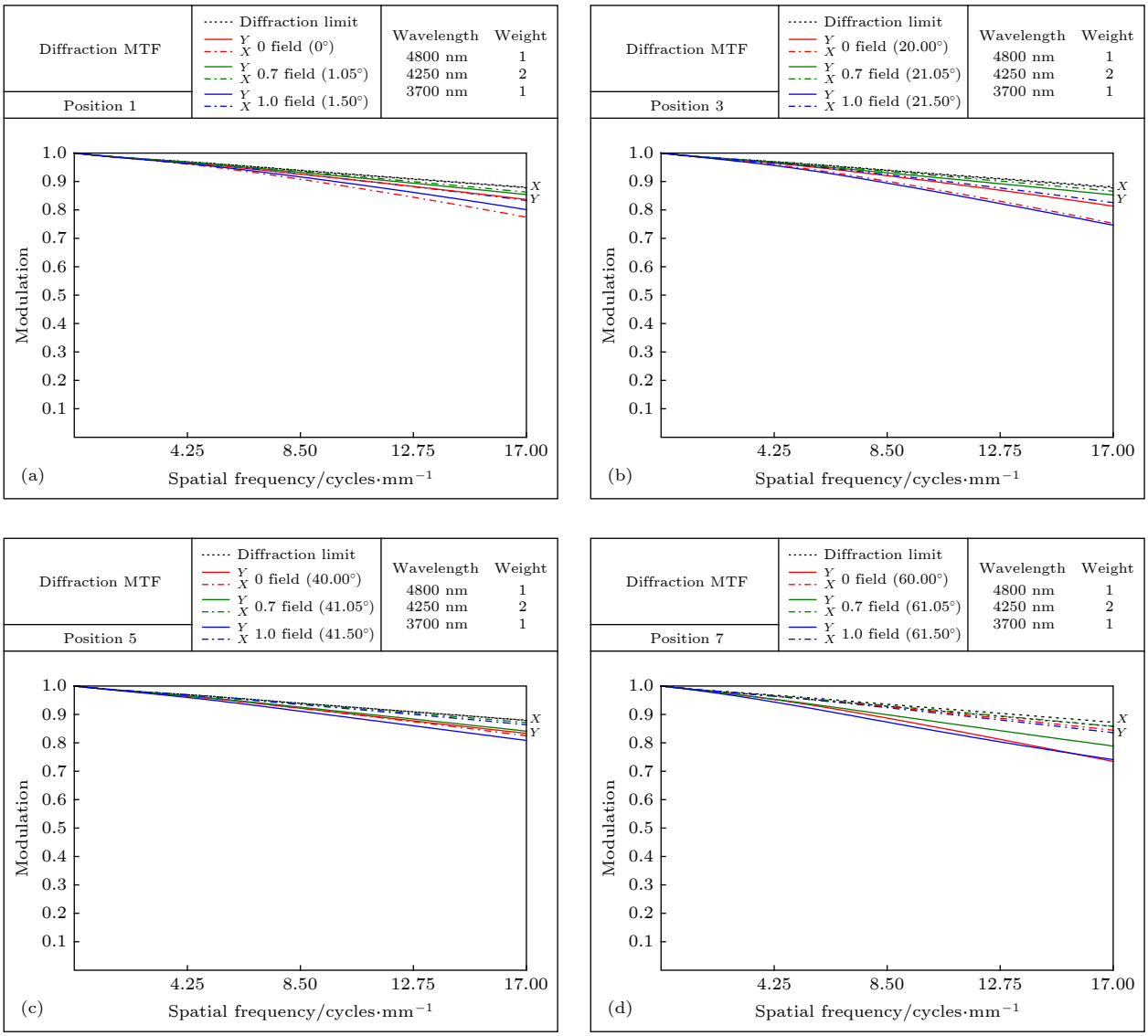

图 8 不同变焦位置的 MTF 图 (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; (d) 60°

Fig. 8. MTF for different zoom positions: (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°; (d) 60°.

5 结 论

根据空中高速飞行平台对窗口元件的特殊需求, 设计了扫描视场为 ± 60°的超大视场椭球形窗口光学系统. 首先以减少系统像差种类为导向, 进行初始光路设计, 从而减少后续优化模式个数; 再利用基于模型的遗传算法对变形镜面形进行控制, 校正波前像差. 利用变形镜驱动器电压与 Zernike 系数的转换矩阵, 将优化变量由 140 个减小到 8 个, 使得各典型扫描视场点的平均优化时间大幅降低, 优化速度提升 95% 以上. 在未来的工作中, 将进一步研究不同 Zernike 模式的权重对优化速率的影响, 从而进一步提高算法的效率和实用性. 该优化方法不仅可以修正异形光学头罩、窗口引起的像差, 同时还能够补偿光学系统装调、加工时引起的误差, 具有较强的实用性.

参考文献

[1] Zhang Y Q, Chang J, Dang F Y, Bai X D, Pan G Q 2020 *Chin. Opt. Lett* **18** 072201

[2] Knapp D 2002 *Proc. SPIE* **4832** 394

[3] Xue W H, Wang H, Bao C H, Fan Z G 2017 *J. Appl. Opt.* **38** 1000 (in Chinese) [薛文慧, 王惠, 包春慧, 范志刚 2017 应用光学 **38** 1000]

[4] Shi Y T, Zhai J L, Chen S Q, Fan Z G 2016 *Aero. Weap.* **1** 51 (in Chinese) [史要涛, 翟金龙, 陈守谦, 范志刚 2016 航空兵器 **1** 51]

[5] Zhang Y Q, Chang J, Pan G Q 2019 *J. Appl. Opt.* **40** 965 (in Chinese) [张运强, 常军, 潘国庆 2019 应用光学 **40** 965]

[6] Zhang W, Wang D S 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 61 (in Chinese)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[张旺, 汪东生 2014 光学学报 **34** 61]
[7] Li H Z, Huang C C, Zhang Y Q, Niu Y J, Song D L, Chang J 2017 *Infraed Laser Eng.* **46** 11 (in Chinese) [李衍璋, 黄长春, 张运强, 牛亚军, 宋大林, 常军 2017 红外与激光工程 **46** 11]
[8] Chang J, Liu L P, Cheng D W, Zhao N 2009 *J. Infrared Milli. Waves* **28** 204 (in Chinese) [常军, 刘莉萍, 程德文, 赵楠 2009 红外与毫米波学报 **28** 204]
[9] Chang J, He W B, Feng S L 2011 *J. B. Inst. Techno.* **31** 333 (in Chinese) [常军, 何伍斌, 冯树龙 2011 北京理工大学学报 **31** 333]
[10] Song D, Chang J 2013 *Optik* **124** 2455
[11] Morgan D, Cook L 1996 *US Patent* 6018424
[12] Chen C 1997 *US Patent* 6091548
[13] Yu J Q, Chen S Q, Dang F Y, Li X S, Shi X T, Ju L, Wang H, Xu X M, Fan Z G 2020 *Opt. Commun.* **463** 125121
[14] Wang C, Zhang X, Wang L J, Qu H M, Wang C 2013 *J. Infrared Milli. Waves* **32** 260 (in Chinese) [王超, 张新, 王灵杰, 曲贺盟, 王超 2013 红外与毫米波学报 **32** 260]
[15] Dong B, Li Y, Han X L, Hu B 2016 *Sensors* **16** 1414
[16] Li D X, Lu Z W, Sun Q, Liu H, Zhang Y C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5766 (in Chinese) [李东熙, 卢振武, 孙强, 刘华, 张云翠 2007 物理学报 **56** 5766]
[17] Sun J X, Sun Q, Li D X, Lu Z W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3900 (in Chinese) [孙金霞, 孙强, 李东熙, 卢振武 2007 物理学报 **56** 3900]
[18] Crowther B, McKenney D, Mills J 1998 *Proc. SPIE* **3482** 4861
[19] Guo A L, Zhu H D, Yang Z P, Tang S W, Xie X L, Zhu J Q 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 11 (in Chinese) [郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 唐仕旺, 谢兴龙, 朱建强 2013 光学学报 **33** 11]
[20] Lu J G, Li Q, Wang H, Cao Y J 1997 *Principle of Genetic Algorithm and its Engineering Application* (Xuzhou: China University of Mining and Technology Press) p8 (in Chinese) [陆金桂, 李谦, 王浩, 曹一家 1997 遗传算法原理及其工程应用 (徐州: 中国矿业大学出版社) 第8页]
[21] Wang C 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王超 2014博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
[22] Yang H F 2008 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [杨华峰 2008 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
[23] Zhou R Z, Yan J X, Zhao D Z, Cao D Z, Yu R 1996 *Adaptive Optics* (Beijing: National Defense Industry Press) p320 (in Chinese) [周仁忠, 阎吉祥, 赵达尊, 曹根瑞, 俞信 1996 自适应光学 (北京: 国防工业出版社) 第320页]
[24] Zhou R Z, Yan J X 1996 *Adaptive Optics Theory* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p371 (in Chinese) [周仁忠, 阎吉祥 1996 自适应光学理论 (北京: 北京理工大学出版社) 第371页]

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Aberration correction for ellipsoidal window optical system based on Zernike mode coefficient optimization*

Liang Dian-Ming [1)] Wang Chao [1)2)†] Shi Hao-Dong [1)] Liu Zhuang [1)]
Fu Qiang [1)] Zhang Su [1)] Zhan Jun-Tong [1)] Yu Yi-Xin [3)]
Li Ying-Chao [1)] Jiang Hui-Lin [1)]

1) (*National and Local Joint Engineering Research Center for Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*)

2) (*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

3) (*School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*)

(Received 17 June 2020; revised manuscript received 28 July 2020)

Abstract

The traditional window of high-speed aircraft is hemispherical, and the aberration produced by such a window is constant. However, the hemispherical window is difficult to meet the requirements of a high speed flight of aircraft. Aspheric windows are usually used to replace hemispherical windows to increase the aerodynamic performance. However, the aspheric window will introduce dynamic aberrations that fluctuate with the change of scanning field-of-view (FOV), which becomes the key issue of the development of optoelectronic imaging systems for high-speed aircraft. For the ellipsoidal window optical system with scanning FOV of $\pm 60°$, an aberration correction method in large FOV combined with the static correction and non-wavefront-sensor adaptive optical correction is studied. In the initial optical structure design, the types of system aberration are reduced and the fifth-order Zernike aberration is eliminated during initial aberration correction, thus, the number of the subsequent adaptive optimization control variables is reduced. According to the characteristics of the deformable mirror, the driving voltage of the driver is generally taken as a variable of the genetic algorithm. However, when the deformable mirror used has many units, too many variables will directly lead the optimization speed of the algorithm to greatly decrease. So, according to the aberration characteristics of the ellipsoidal optical window, using the conversion matrix between the Zernike polynomial coefficients and the voltages of the deformable mirror driver, the optimization variable is reduced from 140 driver voltages to 2–9 Zernike stripe polynomial coefficients in number. Finally, the genetic algorithm based on Zernike model is used to control the shape of the deformable mirror and correct the residual aberration. Taking 2–9 Zernike mode coefficients, 2–16 Zernike mode coefficients and 140 driver voltages as the variables of genetic algorithm respectively, the optimization generations of genetic algorithm under different variables are obtained. The simulation results show that the optimization speed of each typical scanning field of view is increased more than 95% by changing the variable from 140 driver voltages to 2–9 Zernike mode coefficients, and the imaging quality is close to the diffraction limit. This optimization method can not only correct the aberrations caused by the special-shaped optical window, but also compensate for the error caused by processing and aligning the optical system.

Keywords: aspheric window, Zernike polynomials, deformable mirror, genetic algorithm

PACS: 42.15.Fr, 42.15.Eq, 85.85.+j, 78.20.Bh **DOI:** 10.7498/aps.69.20200933

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61805028, 61805027, 61705019, 61701045, 61890960), the Special Fund for The State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense (Grant No. KJSP2016010202), the Project supported by the Joint Funds for astronomy of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1731240), the Scientific Research Foundation of the Education Department of Jilin Province, China (Grant No. JJKH20190563KJ), the Natural Science Foundation of Jilin Province, China (Grant No. 20180101338JC), and the Open Fund for State Key Laboratory of Applied Optics, China (Grant No. SKLA02020001A11).

† Corresponding author. E-mail: Nicklo19992009@163.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net