

激光与光电子学进展

基于遗传算法的变形反射镜快速设计

李兴春^{1,2,3}, 樊新龙^{1,2*}, 张小军^{1,2}, 周虹^{1,2}, 官春林^{1,2}, 顾乃庭^{1,2}¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 变形反射镜是自适应光学系统的核心器件,其校正能力受多种因素的影响,设计过程属于多维变量优化问题。针对现有变形反射镜设计方法需要进行长周期反复迭代,效率较低的问题,提出了一种新型变形反射镜设计方法。将遗传算法与弹性力学影响函数分析模型相结合,显著提升变形反射镜的设计效率,为变形反射镜的高效研制提供保障。基于该方法进行离焦、像散校正变形反射镜结构参数的设计。结果表明,该方法通过100次迭代就完成了11个变量的收敛优化,大幅减少个体计算量,实现变形反射镜的快速设计。

关键词 光学器件; 变形反射镜; 遗传算法; 弹性力学; 参数设计; 设计效率

中图分类号 TH744

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220771

Rapid Design of Deformable Mirror Based on Genetic Algorithm

Li Xingchun^{1,2,3}, Fan Xinlong^{1,2*}, Zhang Xiaojun^{1,2}, Zhou Hong^{1,2},
Guan Chunlin^{1,2}, Gu Naiting^{1,2}¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;²Institute of Optic and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;³Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100049, China

Abstract A deformable mirror is the core component of an adaptive optics system, its ability to correct is affected by many factors, and its design process is a multidimensional variable optimization problem. The existing design methods for deformable mirrors require repeated iterations over a long period, and the efficiency is low, making it difficult to adapt to the increasing demand for the development efficiency of deformable mirrors. To solve the abovementioned problems, this paper proposes a new design method for deformable mirrors that combines a genetic algorithm and an elastic mechanics influence function analysis model to significantly increase the design efficiency of deformable mirrors and realize rapid design of deformable mirrors. Based on the proposed method, the structural parameters of the defocus and astigmatism-corrected deformed mirror are designed. The results show that the method successfully optimizes the convergence of 11 variables over 100 iterations, significantly reducing the number of individual calculations and allowing for the rapid design of deformable mirrors.

Key words optical design; deformable mirror; genetic algorithm; elastic mechanics; parametric design; design efficiency

1 引言

变形反射镜的主要作用是产生受控变形以引入波前误差^[1],是自适应光学系统具有能动可变特性的关键,其研制水平是自适应光学技术能力的重要标志之一。因此,变形反射镜一直是自适应光学技术的研究重点。

关于变形反射镜的设计问题,人们探索了不同驱动方式、驱动原理以及驱动器排布方式对变形反射镜校正能力的影响^[2-8],形成一套行之有效的结构参数设计优化流程:1)根据校正需求及相关经验公式确定驱动器数量量级;2)根据有效校正面积需求确定初始结构尺寸等参数;3)建立三维模型,分析驱动器的影响函数;4)根据驱动器影响函数分析校正残差,评估校正效

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-15; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(12073031)、优秀青年基金(12022308)、中国科学院青年创新促进会(2018412)

通信作者: *fanxl@ioe.ac.cn

果;5)利用控制变量法调整设计参数,迭代优化获得合理的结果。基于上述设计流程:曹朔等^[9-10]研究了镜面材料、物理参数、磁体尺寸、线圈尺寸以及驱动器对音圈变形反射镜校正面形的影响;刘李辉等^[11]分析了极头半径和驱动器间距对变形反射镜镜面形变的影响;吴伟彬等^[12]主要分析了横向压电变形反射镜镜面厚度和压电陶瓷驱动器(PZT)厚度对变形反射镜镜面形变的影响;谢丽等^[13]分析了失效驱动器对变形反射镜校正性能的影响;Ma等^[14]分析了极头间距和支撑方式对变形反射镜校正性能的影响;杨开科等^[15]研究了压电变形反射镜材料、支撑方式、厚度等对变形反射镜校正能力的影响,并利用正交组合遍历算法优化变形反射镜参数。上述研究分析了各种因素对变形反射镜校正能力的影响,为变形反射镜的研制提供了很好的参考。但对于调参数目较多的变形反射镜,无论是控制变量法,还是遍历算法,均会导致个体计算量较大,从而限制变形反射镜研制效率的提升。

针对上述问题,本文提出一种新型变形反射镜设计方法,以弹性力学为出发点构造变形反射镜影响函数,利用遗传算法对变形反射镜结构参数进行参数选择、优化,通过算法有目的进行迭代优化,大幅度减少

个体计算量,完成变形反射镜的快速设计。

2 基本原理

以弹性力学为出发点构造变形反射镜影响函数,利用遗传算法完成变形反射镜的快速设计,具体流程如图 1 所示。先根据校正要求明确校正目标,确定遗传算法的适应度函数与驱动器初始排布,然后根据驱动器初始排布明确变形反射镜校正能力的影响因素,以确定参数个体及取值空间。分析变形反射镜校正能力的步骤如下:1)将变量值代入弹性力学模型计算驱动器的影响函数;2)采用最小二乘法计算校正目标所需的驱动系数;3)通过线性叠加原理得到拟合面形;4)对比拟合面形与校正目标,得到校正残差。参数迭代步骤如下:1)将校正残差代入适应度函数,计算适应度;2)判断算法是否收敛或达到设定循环次数;3)若满足收敛条件则输出并储存变量及残差,否则对参数个体进行遗传、交叉、变异得到新参数值,重新进行迭代计算,直至满足适应度函数条件。最后,评估设计结果是否满足校正要求,若满足则输出相应驱动排布及结构参数值,反之则调整初始驱动器排布或参数个体取值空间重新进行优化。

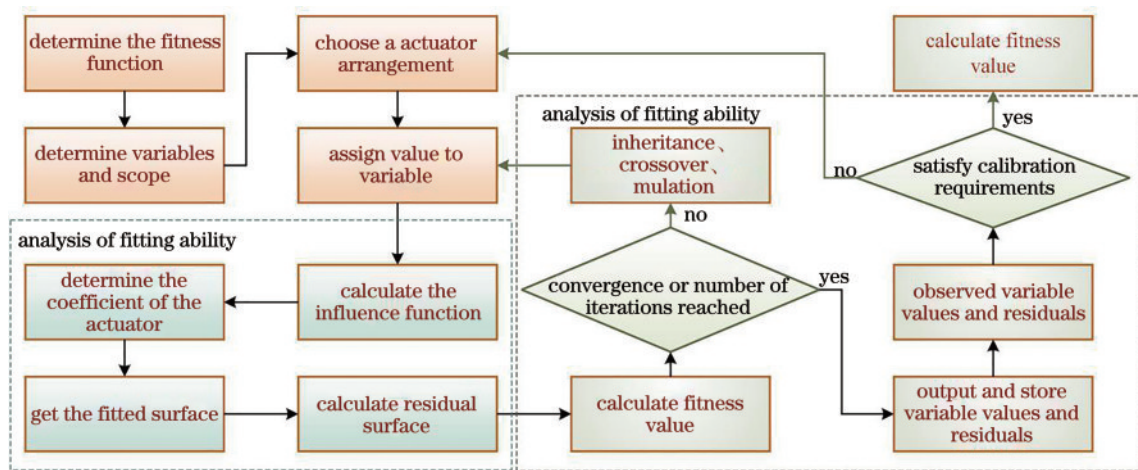


图 1 基于遗传算法的变形反射镜结构优化流程图

Fig. 1 Flow chart of structural optimization of deformable mirror based on genetic algorithm

2.1 遗传算法

遗传算法是一种基于自然选择和群体遗传机理的搜索算法,可模拟自然选择和自然遗传过程中的繁殖、杂交和突变现象^[16],其流程如图 2 所示。遗传算法是一个不断优化的过程,由随机产生的个体初始解计算适应度值,然后基于该适应度值选择个体,个体经交叉和变异算子组合生成新一代个体。新一代个体继承了上一代个体的优良性状且在性能上优于上一代个体,从而逐步朝着最优解的方向进化。本文方法以影响校正效果的变形反射镜结构参数作为遗传算法的个体,取值范围作为个体取值范围,通过校正残差建立适应度函数。

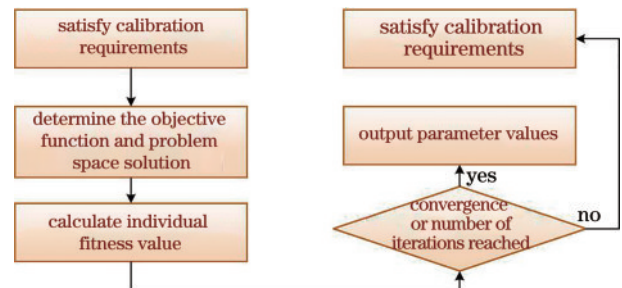


图 2 遗传算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of the genetic algorithm

2.1.1 算法的个体及取值空间

影响不同变形反射镜镜面形变的因素不同,通常

考虑的因素有变形反射镜厚度、变形反射镜的镜面尺寸、驱动器位置、粘胶强度、粘胶点面积大小等。遗传算法的个体及取值根据影响变形反射镜形变的参数取值确定,个体主要为影响变形反射镜形变的参数,取值空间则对应参数的取值范围。面对不同变形反射镜的设计要求,可定义不同的个体以及取值空间,根据实际情况以浮动的参数作为个体变量求解最优结构参数。本文算法所涉及的个体有变形反射镜的厚度、环布驱动器位置、固定约束位置以及中心驱动器面积。其中,以驱动器离中心距离作为变量个体时,个体数目随驱动层层数的变化而变化。

2.1.2 算法的适应度函数

在自适应光学系统内进行像差校正分析时,通常以对 Zernike 像差的拟合能力作为基准,通过变形反射镜拟合面形与待校正面形的残差判断其校正能力^[17-20]。数值仿真时,以残差面形的均方根(RMS)值为像差校正效果的评判数值。由于待校正面形可由不同的 Zernike 像差面形叠加组合,变形反射镜的校正能力由多种 Zernike 像差进行综合校正,则变形反射镜的校正能力可表示为

$$\Psi(x, y) = \sum_i [C_i Z_i(x, y) + \epsilon_i], \quad (1)$$

式中: Z_i 为 Zernike 多项式的第 i 项; C_i 为 Zernike 多项式对应的系数; ϵ_i 为每一项的校正残差。如果变形反射镜可以很好地拟合所需 Zernike 多项式中每一项 Zernike 像差,就能通过调整 Zernike 多项式前的系数很好地拟合波前像差。考虑到变形反射镜需动态实时校正不同面形,为使结构尽可能校正各种像差,将算法适应度函数设置为像差校正后残差面形的 RMS 值与 Zernike 像差面形 RMS 值比的和,可表示为

$$X_{\text{Final}}(x) = \sum_i^j (a_i X_i^{\text{after}} / X_i^{\text{before}}), \quad (2)$$

式中: X_i^{after} 为校正后残差面形的 RMS 值; X_i^{before} 为原始像差面形的 RMS 值; a_i 为对应系数。适应度函数由待校正 Zernike 像差的项数决定,可根据各项 Zernike 像差的占比适当调整残差占比前的系数。

2.1.3 算法的迭代次数

算法的个体数随着驱动层数的增加而增加。假定变形反射镜除中心驱动器外有 x 层驱动层,则算法个体数为 $3+x$ 。假定每个变量取 100 个值,传统算法的个体计算量在 $100^4 \sim 100^{11}$ 之间,而利用遗传算法进行收敛迭代可大幅度降低个体计算量。传统算法和遗传算法的迭代次数如图 3 所示。可以发现,相比传统算法,遗传算法的迭代次数有大幅度降低,且变量个体数目越多,遗传算法的优势越明显。

2.1.4 算法的优化效果

为验证遗传算法的优化效果,以待校正像差的离焦和像散为例,以两者校正残差的占比和为判断依据,计算 100 组随机参数与算法优化后参数的校正效果,

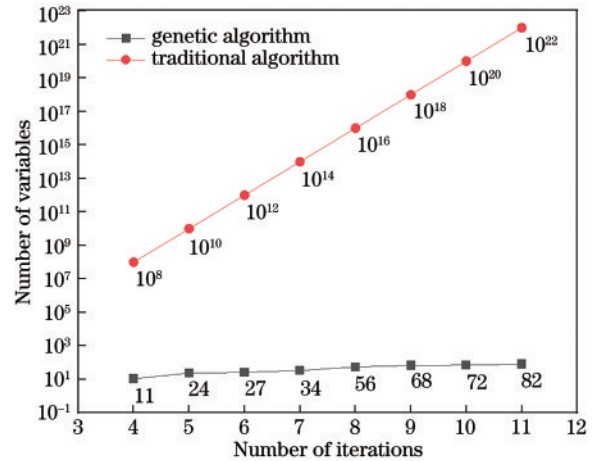


图 3 不同算法的迭代次数

Fig. 3 Iteration times of different algorithms

结果如图 4 所示。可以发现:在变量范围下随机取值后得到的校正效果不稳定,像差综合校正能力较差;相反,经遗传算法优化后,随着结构参数值的逐渐稳定,像差校正后的残差也逐渐收敛直至稳定,且残差占比相比随机参数校正后的残差占比有大幅下降。

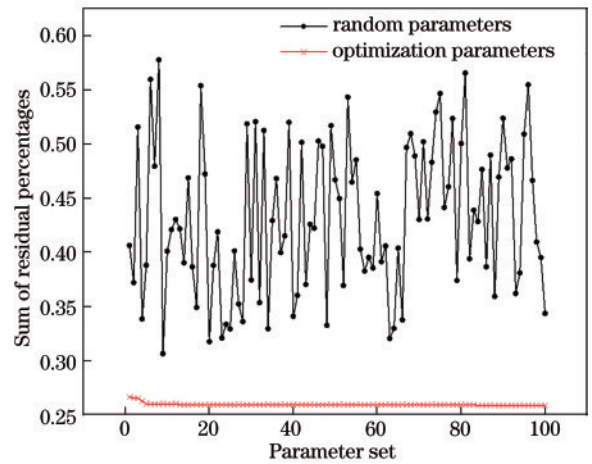


图 4 遗传算法的优化效果

Fig. 4 Optimization effect of the genetic algorithm

2.2 基于弹性力学的影响函数模型

影响函数为单位力或单位位移驱动下变形反射镜的面形,描述方法主要有类高斯函数近似拟合、有限元仿真分析模型^[21]以及利用弹性力学公式拟合。其中:类高斯函数拟合的影响函数与结构参数关系较弱,主要用于系统校正能力仿真;有限元仿真计算得到的影响函数精确度较高,但计算量较大,且需要较为复杂的结构参数与计算结果传递,影响优化效率;弹性力学公式可以利用准确描述具体结构参数下变形反射镜的影响函数。因此,本方法采用弹性力学构造结构参数与影响函数的关系。

变形反射镜的形变符合弹性薄板小变形原理,可根据弹性薄板小变形挠度公式得到影响函数面形。不同的驱动器位置对应不同的影响函数面形公式。主要

包括驱动器在中心位置的影响函数和驱动器处于偏心位置下的影响函数^[22]。

对于中心载荷驱动,当所求点在载荷作用面内部,即 $r_0 \geq r \geq 0$ 时,存在

$$\omega = [0.171k^4 - (1.05 - 0.184K^2)k^2K^2 + (1.37 \frac{k^2}{K^2} + 0.683)K^4 \ln K + 0.173K^2 - 0.104K^4]m^4q, \quad (3)$$

当所求点在载荷作用面外部,即 $a \geq r \geq r_0$ 时,存在

$$\omega = [0.263(1 - k^2)(6.6/K^2 - 0.3) + 0.683(1 + \frac{2k^2}{K^2}) \ln k] \frac{K^4 m^4 q t}{E} \quad (4)$$

对于偏心载荷驱动,存在

$$\omega = [A_0(k^3 - b_0k^2 + c_0) + A_1(k^4 - b_1k^3 + c_1k) \cos \phi + A_2(k^4 - b_2k^3 + c_2k^2) \cos 2\phi] m^2 \frac{q}{Et}, \quad (5)$$

式中: $A_0, A_1, A_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2$ 均可由 K, k 表示; t 为镜面厚度; $m = a/t$; q 为施加载荷; E 为镜面弹性模量; ϕ 为两条线之间夹角,一条线为偏心载荷圆中心与圆板中心连线;另一条线为所求点到圆板中心的连线。

仿真得到不同位置驱动下的影响函数面形如图 5 所示。在完成驱动器影响函数解析计算的基础上,采用有限元方法计算驱动器影响函数,观察弹性力学模型和有限元模型下的影响函数面形是否一致。以中心驱动器影响函数为例,令变形反射镜的镜面半径为 60 mm,厚度为 7 mm,中心驱动器的作用半径为 5 mm,仿真得到的影响函数如图 6 所示。可以发现,两种模型下残差面形的峰谷(PV)值为 0.0838, RMS 值为 0.0584,验证了弹性力学模型的有效性。

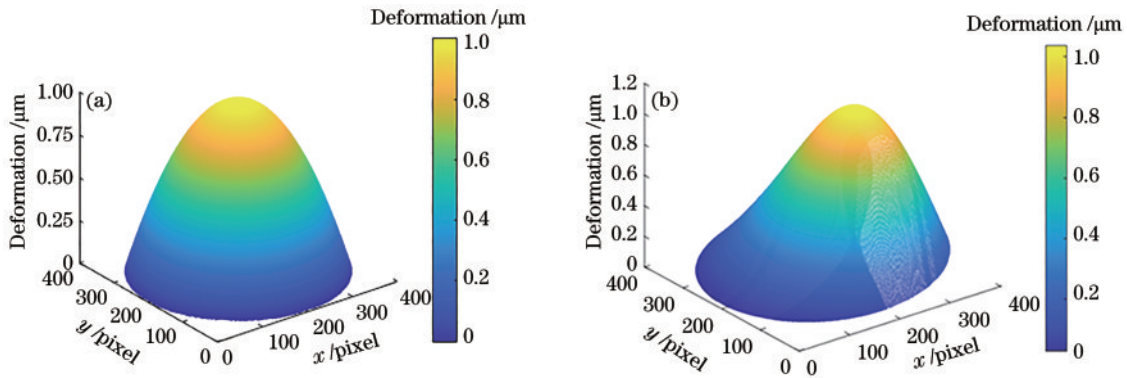


图 5 变形反射镜的影响函数。(a)中心驱动;(b)偏心驱动

Fig. 5 Influence function of the deformable mirror. (a) Center actuator; (b) eccentric actuator

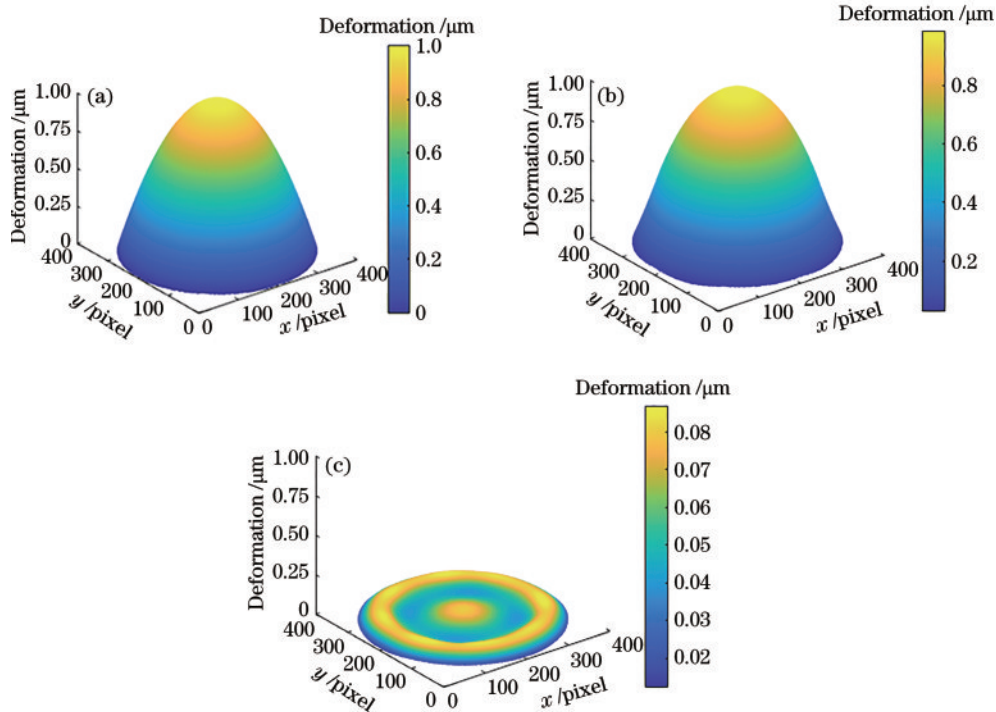


图 6 影响函数的面形。(a)解析模型;(b)有限元模型;(c)残差面形

Fig. 6 Surface shape of the influence function. (a) Analytical model; (b) finite element model; (c) residual surface shape

3 低阶变形反射镜的优化设计

3.1 设计要求

基于上述变形反射镜的快速设计方法,对一块变形反射镜进行优化设计。主要要求:1)变形反射镜既能校正离焦像差又能校正像散像差;2)离焦校正残差小于10%,像散校正残差小于8%;3)变形反射镜的有效校正口径为100 mm;4)驱动层数及驱动器数目尽可能少。

3.2 设计过程

首先,根据变形反射镜要求确定算法的适应度函数及驱动器初始排布。由于变形反射镜需要校正的像

差为离焦和像散像差,则根据式(2)得到的适应度函数可表示为

$$X_{\text{Final}}(i) = X_{\text{defocus}}^{\text{rms}} / X_{\text{defocus}}^{\text{RMS}} + X_{\text{astigmatism}}^{\text{rms}} / X_{\text{astigmatism}}^{\text{RMS}}, \quad (6)$$

式中: $X_{\text{defocus}}^{\text{rms}}$ 为变形反射镜校正离焦像差后残差面形的RMS值; $X_{\text{defocus}}^{\text{RMS}}$ 为待校正离焦像差面形的RMS值; $X_{\text{astigmatism}}^{\text{rms}}$ 为变形反射镜像散像差后残差面形的RMS值; $X_{\text{astigmatism}}^{\text{RMS}}$ 为待校正像散像差面形的RMS值。

考虑到目标校正像差只有离焦和像散,介于离焦和像散的面形,参考Dibaee等^[23]的研究,采用的驱动器排布为中心驱动器与周边环布驱动器。周边环布驱动器由一层或多层驱动环组成,每一层驱动环上驱动器数为均布4点或均布8点,如图7所示。

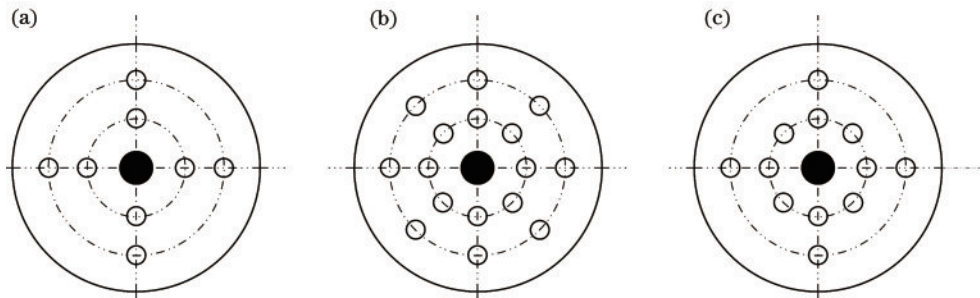


图7 驱动器的排布示意图。(a)4点驱动层;(b)8点驱动层;(c)混合驱动层

Fig. 7 Schematic diagram of the actuator arrangement. (a) 4-point actuator layer; (b) 8-point actuator layer; (c) hybrid actuator layer

驱动器层数由最低1层增至8层,驱动器数量由5增值到33个。考虑到驱动器数越多,变形反射镜拟合面形越接近真实值,初始驱动器排布由中心驱动器加8层驱动器组合排布逐步减小驱动层与驱动器数。确定算法个体及取值范围的方法如下:令 l 为变形反射镜有效校正圆半径; a 为变形反射镜的镜面半径; b 为中心驱动器的作用面半径; t 为变形反射镜的厚度; r_i 为第 i 层驱动层离中心的距离; θ 为两驱动层之间夹角,取值范围为 45° 或 90° 。根据离焦、像散像差面形特征,初始驱动排布中心层采用8点驱动,由内向外驱动层采用均布4点与8点交叉分布,具体示意图如图8所示。

假设变形反射镜的有效校正区域半径为 z (单位为mm),为保证像散像差的校正效果,进行如下设置:固定点离中心的距离应适当大于变形反射镜的有效校正直径,将 a 的取值范围设置为 $1.2z \sim 1.7z$;根据薄板定义,厚度与横向最小尺寸比值介于 $0.0125 \sim 0.2$ 之间,当 a 取最小值和最大值时, t 的取值范围分别为 $0.03z \sim 0.48z$ 和 $0.05z \sim 0.68z$,考虑到变形反射镜为薄板,将 t 的取值范围设置为 $0.051z \sim 0.48z$; b 的取值范围为 $1 \sim 20$ mm; r_i 的取值范围为 $b \sim a$ 之间。当 $z = 50$ mm时,变形反射镜其余参数的取值范围如表1所示。

利用算法个体初始值计算变形反射镜校正能力。以3层驱动层为例,由式(3)~(5)得到变形反射镜单个驱动下中心和偏心驱动层的影响函数面形,如图9所示。

以影响函数面形为子面形,计算各个驱动器下的

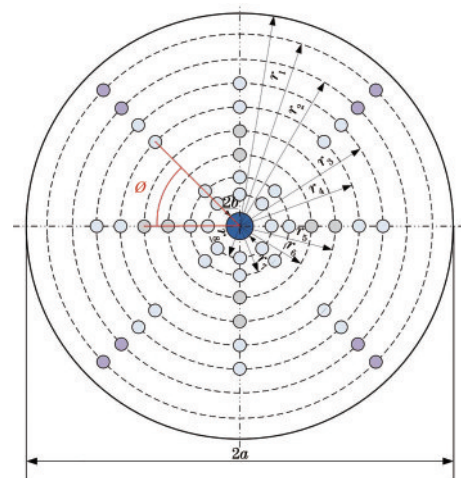


图8 变形反射镜的参数示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the parameters of the deformable mirror

表1 变形反射镜结构参数取值范围

Table 1 Value range of structural parameters of

Parameter	deformable mirror					unit: mm
	l	a	b	t	r_i	
Value range	50	60-85	1-25	3-24	25-85	

系数,通过线性叠加得到与离焦、像散最接近的面形并计算变形反射镜的拟合面形与离焦、像散像差面形的残差面形,通过残差面形的RMS值反映反射镜的校正能力。利用自适应函数值为循环依据评判算法的个体

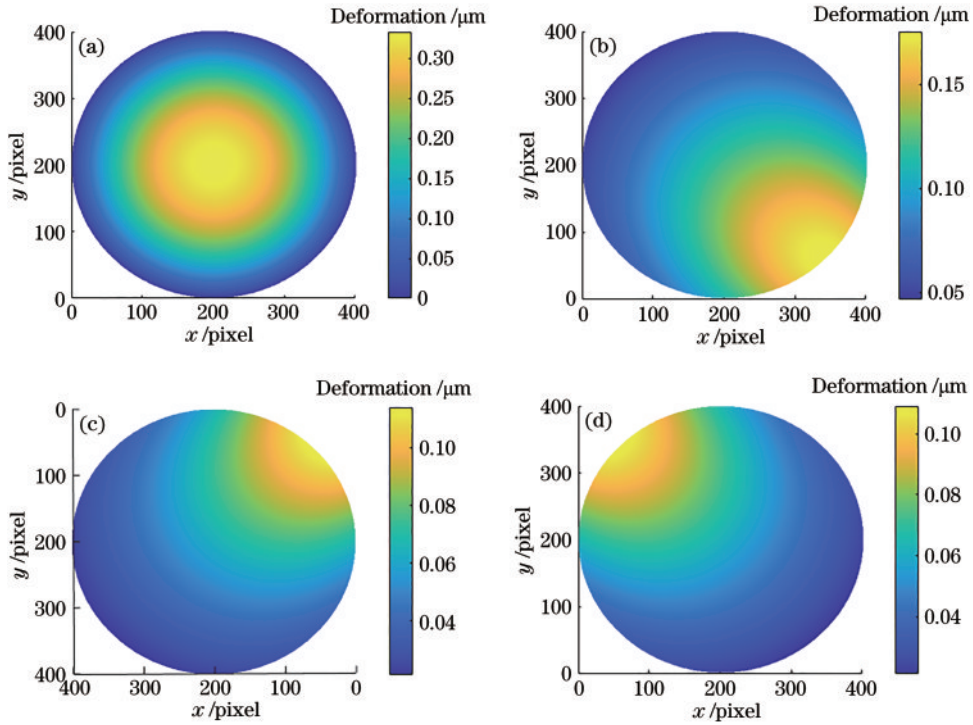


图 9 变形反射镜的影响函数。(a)中心驱动;(b)内层;(c)中心层;(d)外层

Fig. 9 Influence function of the deformable mirror. (a) Center drive; (b) inner layer; (c) center layer; (d) outer layer

值是否合理,在自适应函数值未达到最小值时,算法需不断调整个体值完成迭代。其中,算法的迭代次数及收敛速度取决于个体数目及个体取值范围的大小。最后,判断该驱动器排布下变形反射镜在个体空间内能否达到校正要求:若达到要求,则输出算法的个体值;若不能达到要求,则可根据校正效果进一步更换驱动排布或驱动器层直至满足校正要求。

初始驱动器排布设定为 8 层驱动,在算法迭代时,以 11 个变量为优化个体,根据 11 个变量下变形反射镜校正的残差效果适当减少驱动器层数及驱动器数目。根据表 1 中的参数取值范围,仿真得到变形反射镜驱动层为 8,驱动排布为图 8 时算法收敛情况,如图 10 所

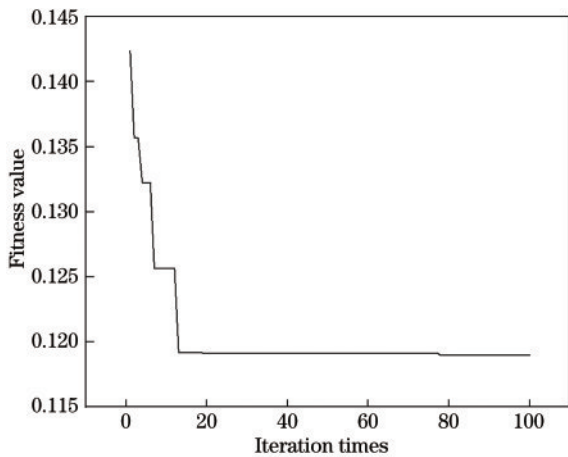


图 10 遗传算法的收敛曲线

Fig. 10 Convergence curve of the genetic algorithm

示。可以发现,在初始驱动层为 8、个体数为 11 时,本文算法可在 100 次内完成迭代优化,且优化后的残差占比和比较理想。考虑到加工成本以及迭代次数随着变量个体增加而增加的问题,在实际情况中会尽量选择驱动层少的驱动排布。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 变形反射镜的优化设计结果

针对待优化的变形反射镜,通过不断迭代计算,观察不同驱动层数下变形反射镜校正效果,以结合实际情况选择驱动器的排布方式,像差校正效果与驱动器层数的关系图如图 11 所示。可以发现,变形反射镜对

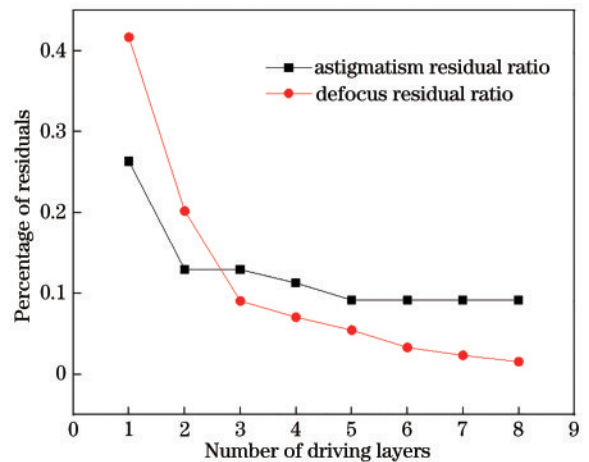


图 11 不同驱动层下变形反射镜的校正效果

Fig. 11 Correction effect of deformable mirror under different driving layers

离焦、像散的校正效果随着驱动层数的增加而增强,但驱动层大于 3 后,再增加层数对变形镜校正能力的提升效果不大。基于有限元方法对变形镜的校正能力进行分析,结果表明,3 层驱动层数下变形反射镜对离焦、像散的校正能力均满足技术要求。因此,设置变形反射镜最终结构驱动排布层数为 3 层,通过不断迭代得到其他结构参数值,如表 2 所示。其中,第 1 个驱动层为 4 个驱动器,第 2 个驱动层为 8 个驱动器,第 3 个驱动层为 4 个驱动器。

3.3.2 结果验证与对比

利用表 2 中变形反射镜的结构参数建立变形反射

表 2 变形反射镜的结构参数

Table 2 Structural parameters of the deformable mirror unit: mm

Parameter	z	a	b	t	r_1	r_2	r_3
Value range	50	85	23	7.8	52	65	80

镜模型,通过有限元分析变形反射镜形变,拟合得到变形反射镜模型的离焦、像散面形如图 12 所示。可以发现,对于像差 PV 值为 1 的标准 Zernike 像差而言,通过调整驱动器的驱动系数可做到大致拟合变形反射镜模型,且拟合面形轮廓与幅度值和标准 Zernike 像差相似。

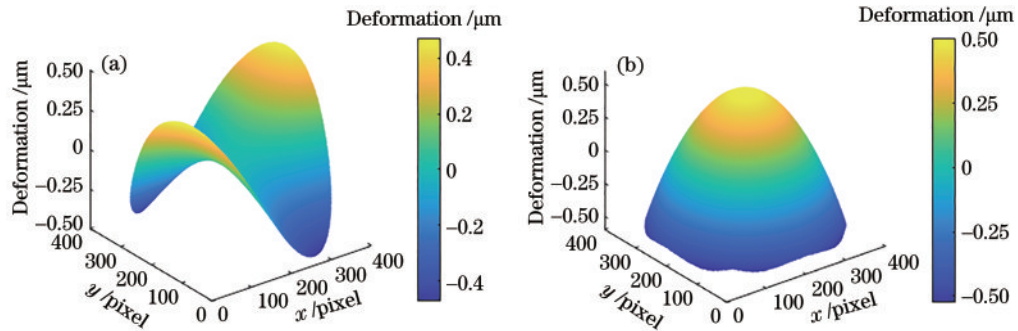


图 12 变形反射镜的网格模型与拟合像差。(a)像散拟合面形;(b)离焦拟合面形

Fig. 12 Mesh model and fitted aberration of the deformable mirror. (a) Astigmatism fitted surface; (b) defocus fitted surface

通过有限元仿真计算同一参数结构下变形反射镜模型的校正效果。利用变形反射镜模型分别对 PV 值为 1 的离焦、像散面形进行拟合,并将拟合像差面形与 PV 值为 1 的标准 Zernike 像差面形做差,得到的两种像差的残差面形如图 13 所示。可以发现,无论是离焦像

差还是像散像差,针对 PV 值为 1 的标准像差,变形反射镜模型均能将残差面形 PV 值控制在 10% 以内,且最终像散残差面形 RMS 值为原始面形的 5%,离焦残差面形为原始面形的 4%。这表明本文算法得到的变形反射镜模型能够很好地满足变形反射镜校正要求。

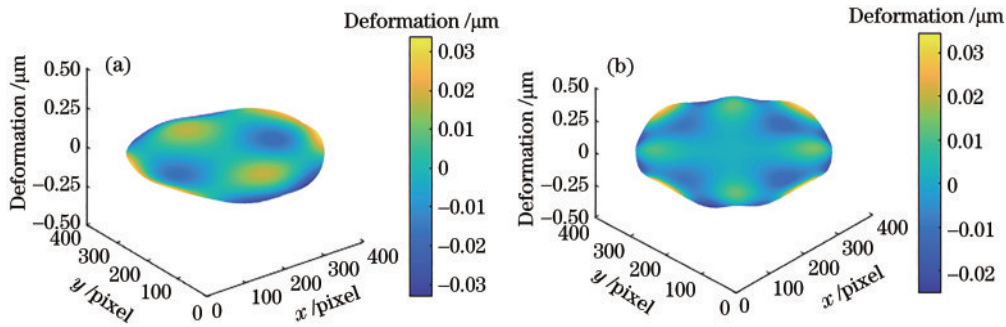


图 13 变形反射镜的校正残差。(a)像散残差;(b)离焦残差

Fig. 13 Correction residuals of the deformable mirror. (a) Astigmatism residual; (b) defocus residual

4 结 论

本文提出了一种基于遗传算法的变形反射镜快速设计方法,以弹性力学为出发点构造影响函数,以校正残差的 RMS 建立适应度函数,完成离焦、像散校正变形反射镜结构参数设计。结果表明,该算法仅通过 100 次迭代就实现包含 11 个变量的变形反射镜结构参数优化设计,且离焦、像散残差面形 RMS 分别为输入波前的 4% 和 5%,达到设计要求,提升了变形反射镜

的研制效率。

参 考 文 献

[1] 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170489.
Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 170489.
[2] 官春林, 张小军, 邓建明, 等. 中国科学院光电技术研究所的变形反射镜研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200337.

- Guan C L, Zhang X J, Deng J M, et al. Deformable mirror technologies at Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(10): 200337.
- [3] Madec P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8447: 844705.
- [4] 刘娟, 赵楚军. 变形镜驱动器位置偏差对低频相位拟合能力的影响[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1029-1032.
- Liu J, Zhao C J. Influence of actuator position deviation on low-frequency phase fitting capability of deformable mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1029-1032.
- [5] 曹芬, 王建华, 张世强, 等. 单驱动器变形镜对低阶像差补偿能力的研究[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 310-313.
- Cao F, Wang J H, Zhang S Q, et al. Compensation capacity of low order aberration using single actuator deformable mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2): 310-313.
- [6] 余江川, 田博宇, 钟哲强, 等. 大遮拦比薄管激光环域像差校正方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0905001.
- Yu J C, Tian B Y, Zhong Z Q, et al. Method for annular aberration correction of large-aperture thin-wall tube lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0905001.
- [7] 周浩, 王欣, 刘强, 等. 渐变厚度主动变形镜的研究[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2422001.
- Zhou H, Wang X, Liu Q, et al. Active deformation mirror with variable thickness[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2422001.
- [8] 陈凯, 陈俊杰, 毛宇昕, 等. 带边缘驱动的 214 单元单压电变形镜仿真与实验[J]. 光子学报, 2016, 45(8): 0822004.
- Chen K, Chen J J, Mao Y X, et al. Simulation and experiment of 214-element unimorph deformable mirror with edge-driven[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(8): 0822004.
- [9] 曹朔, 张志高, 赵子云, 等. 变形镜用高效率音圈驱动器的结构优化设计[J]. 液晶与显示, 2020, 35(11): 1110-1119.
- Cao S, Zhang Z G, Zhao Z Y, et al. Optimized design of high efficient voice coil actuator in deformable mirror[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2020, 35(11): 1110-1119.
- [10] 刘新宇, 曹朔, 胡栋挺, 等. 音圈变形镜的设计及其力学特性分析[J]. 液晶与显示, 2020, 35(8): 801-807.
- Liu X Y, Cao S, Hu D T, et al. Design of voice-coil deformable mirror and its mechanical characteristics[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2020, 35(8): 801-807.
- [11] 刘李辉, 谭碧涛, 麦灿基. 241 单元变形镜结构参数设计及性能仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 090101.
- Liu L H, Tan B T, Mai C J. Structural parameter design and performance simulation of 241-element deformable mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 090101.
- [12] 吴伟彬, 戴一帆, 关朝亮, 等. 横向压电效应变形镜优化设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0818003.
- Wu W B, Dai Y F, Guan C L, et al. Optimization design for transversal piezoelectric effect deformable mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0818003.
- [13] 谢丽, 钟哲强, 张彬. 变形镜部分驱动器断电失效对校正性能的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0223001.
- Xie L, Zhong Z Q, Zhang B. Influence of partially failed actuators of power failure on correction ability of deformable mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0223001.
- [14] Ma J Q, Liu Y, Chen J J, et al. Design and performance testing of 200-element silicon unimorph deformable mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2047-2053.
- [15] 杨开科, 王德恩, 袁强, 等. 高带宽压电变形反射镜多学科仿真与优化设计方法研究[D]. 合肥: 中国工程物理研究院, 2021.
- Yang K K, Wang D E, Yuan Q, et al. Research on multidisciplinary simulation and optimal design method of high bandwidth piezoelectric deformable mirror[D]. Hefei: China Academy of Engineering Physics, 2021.
- [16] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1201-1206, 1210.
- Ma Y J, Yun W X. Research progress of genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(4): 1201-1206, 1210.
- [17] 樊新龙, 官春林, 饶长辉. 1.8 m 望远镜变形次镜波前拟合能力分析[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0822002.
- Fan X L, Guan C L, Rao C H. Wave-front fitting capability analysis of 1.8 m telescope's adaptive secondary mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0822002.
- [18] Tang H, Guo P Z. Phase compensation in non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. Optik, 2014, 125(3): 1227-1230.
- [19] 丁心志. 变形反射镜变形反射镜拟合残余误差分析研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2007.
- Ding X Z. Analysis and research on the fitting residual error of deformable mirror[D]. Chengdu: Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [20] Li Z L, Guan C L, Dai Y F, et al. Optical surface error analysis and compensation technique based on Zernike polynomial coefficients[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12071: 1207108.
- [21] Cheng X M, Wang J D, Hu Y, et al. Simulation analysis on the design of the PZT stacked array deformable mirror[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12059: 120591A.
- [22] 徐灏. 机械设计手册-第 1 卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- Xu H. Machine design handbook-volume one[M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- [23] Dibae B, Jafari A, Amniat-Talab M, et al. Hartmann test with minimum apertures for retrieving the atmospheric primary aberrations[J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(8): 760-770.