

渐变厚度主动变形镜的研究

周浩^{1,2}, 王欣^{1,2*}, 刘强¹, 贾建军^{1,2}, 舒嵘^{1,2}

¹中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了简化空间相机在轨高分辨率成像的促动方案, 提出基于渐变厚度形式的主动变形镜双促动结构。首先根据弹性力学理论, 建立波前像差表示方法与变形镜渐变厚度的理论关系, 可以求解出各种像差模式所需的厚度分布。然后通过结构建模、有限元分析、面型拟合计算和光学性能评估的光机力一体化模拟仿真, 量化评估像差的补偿效果。最后设计渐变厚度变形镜光机结构方案和驱动方案, 采用两个促动器来实现球差与像散的校正。变形镜受力形变实验结果表明, 双促动变形镜可产生较好的球差与像散, 能够有效避免印透效应, 有效补偿自身的加工误差与光学系统的波前误差。

关键词 光学设计; 主动光学; 渐变厚度变形镜; 高分辨率空间相机; 像差校正

中图分类号 TH703

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2422001

Active Deformation Mirror with Variable Thickness

Zhou Hao^{1,2}, Wang Xin^{1,2*}, Liu Qiang¹, Jia Jianjun^{1,2}, Shu Rong^{1,2}

¹Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to simplify the actuation scheme of on-orbit high resolution imaging of space camera, a dual actuation structure of active deformation mirror based on the form of variable thickness is proposed. First, according to the theory of elasticity, the theoretical relationship between the wavefront aberration representation method and the variable thickness of the deformed mirror is established, and the thickness distribution required by various aberration modes can be solved. Then, the effect of aberration compensation is quantitatively evaluated through structural modeling, finite element analysis, surface fitting calculation and optical performance evaluation. Finally, the structure scheme and the driving scheme of the variable thickness deformation mirror optical machine are designed. Two actuators are used to realize the correction of spherical aberration and astigmatism. The deformation experiment results show that the dual-actuated deformation mirror can produce better spherical aberration and astigmatism, avoid the impression effect, and effectively compensate its own machining error and wavefront error of optical system.

Key words optical design; active optics; deformable mirror with variable thickness; high resolution space camera; aberration compensation

OCIS codes 220.1080; 220.1000; 230.4040

1 引言

随着国内外高分辨率星载成像需求的提高, 光

学系统的口径和焦距不断增大。大口径的空间光学遥感器更易遭受外部环境的影响, 导致其成像性能下降。目前, 空间相机常采用被动抑制误差源的方

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-06-10; 录用日期: 2021-06-22

基金项目: 上海技术物理研究所所创新项目(2018-J-1)

通信作者: *wangxin@mail. sitp. ac. cn

法来实现高质量成像,但校正空间环境所引起的球差和像散等波前像差的能力有限^[1]。主动光学技术通过多个促动器的驱动使镜面产生一定的变形量来弥补波前畸变,其作为常用的波前校正技术在光学校正技术中占据重要地位^[2-5]。

由于星上负载、计算能力和数据传输能力等的有限性,对应用于空间相机的主动光学技术提出了新的挑战,减少促动器的数量可简化主动反射镜上促动器的排布以及系统积分、计算和控制难度,降低系统的复杂性。Laslandes 等^[6]在空间望远镜的出瞳处布置口径为 90 mm 以及具有 24 个促动器的变形镜来校正主镜所产生的变形,减小了空间相机上所需变形镜的尺寸;袁健等^[7]对出瞳变形镜的精密调整结构进行进一步分析,提高了出瞳镜的像差补偿能力;陈新东^[8]设计了一套由 9 个促动器单元组成的变形镜并用于空间相机,能够有效校正空间相机中的低阶像差。国际上渐变厚度主动变形镜由法国 Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM) 研究所提出,Lemaitre^[9]结合弹性力学提出了渐变厚度主动变形镜的设想,并将其应用于 VLT (Very Large Telescope) 的变曲率镜设计;Hugot 等^[10]利用弹性理论设计了渐变厚度主动变形镜,有效产生了像散和离焦等像差;Laslandes 等^[11]在此基础上实现了对离焦、像散与彗差的补偿;曹芬等^[12-13]也随之采用边缘促动的方法研究了单驱动器变形镜对低阶像差的补偿能力。

渐变厚度主动变形镜可以采用最少的促动器来获得较好的像差补偿效果。区别于单种像差补偿模式,针对空间相机中较难校正的球差与像散,本文采用两个促动器来同时获取两种像差形式,通过弹性力学来求解补偿像差的主动变形镜厚度分布,设计了变形镜结构与促动方式,利用光机一体化仿真分析来模拟其像差补偿效果;设计和加工口径为 50 mm 的渐变厚度变形镜实验装置,得到了较好的球差与像散面型,实现了“单变形镜-双促动器-双像差”的补偿,深入研究了渐变厚度变形镜的理论建模和补偿机理等关键技术。

2 主动变形镜渐变厚度理论计算

波前信息含有光学系统的波前误差,本文采用幂级数表示波前像差,结合弹性力学理论可以求解出变形镜厚度分布。

已知,波前函数的一般表达式可由汉密尔顿特征方程表示,表达式为

$$W = W_0 + W_2 + W_4 + W_6 + \dots + W_i, \quad (1)$$

式中: W_i 表示由 $w = a_{l,n,m} \bar{\eta}^l \rho^n \cos m\theta$ 形式的多项式组成, i 为偶数,其中 a 为系数, l 、 m 和 n 分别可变正整数,且 $l+n=i$, $m \leq n$, $\bar{\eta}$ 为像面的归一化像高, ρ 为出瞳的归一化半径, θ 为对应的方位角; W_0 为常数,其为波前的原点坐标; W_2 、 W_4 和 W_6 分别为波前高斯项、三阶像差和五阶像差。

三阶像差由汉密尔顿特征方程表示为

$$W_{[4]} = \frac{1}{8} S_I \rho^4 + \frac{1}{2} S_{II} \bar{\eta} \rho^3 \cos \theta + \frac{1}{4} S_{III} \bar{\eta}^2 \rho^2 \cos 2\theta + \frac{1}{4} (S_{III} + S_{IV}) \bar{\eta}^2 \rho^2 + \frac{1}{2} S_V \bar{\eta}^3 \rho \cos \theta, \quad (2)$$

式中: S 为三阶赛德尔像差系数, $S_I \sim S_V$ 依次代表球差、彗差、像散、场曲和畸变。由(2)式可得三阶球差与出瞳归一化半径的四次方成正比,其形状类似四阶非球面。

主动变形镜通过促动器来驱动镜面产生一定形变,镜面面型与补偿的畸变波前共轭,能够补偿波前像差。三阶球差可通过促使镜面变形为四阶非球面来校正,即平面镜面变形后的形变量为

$$z = A_{40} r^4, \quad (3)$$

式中: A_{40} 为三阶球差系数, $A_{40} = -S_I/8$; r 为镜面半口径。

渐变厚度主动变形镜为轴对称圆镜,设厚度随半口径的变化函数为 $t(r)$ 。根据材料力学理论,厚度与材料特性的关系为

$$t^3(r) = 12(1-\nu^2)D(r)/E, \quad (4)$$

式中: $D(r)$ 为刚度; E 为材料杨氏模量; ν 为材料泊松比。

由弹性理论可知材料内部的力矩与刚度和形变的关系为

$$\begin{cases} M_r = D(r) \left[\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \theta^2} \right) \right] = \\ \quad 4(3+\nu)D(r)A_{40}r^2 \\ M_t = D(r) \left[\nu \frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \theta^2} \right] = \\ \quad 4(1+3\nu)D(r)A_{40}r^2 \\ M_{rt} = M_{tr} = (1-\nu)D(r) \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial z}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 z}{\partial r \partial \theta} \right] = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: M_r 为径向弯矩; M_t 为切向弯矩; M_{rt} 和 M_{tr} 分别为径向和切向的扭矩。

在平衡状态下,平板内部的总应力大小为零,其内部弯矩、扭矩及应力如图 1 所示,其中 τ 为切向轴, ω 为纵向轴, Q_r 和 Q_t 分别为径向和切向的剪力,可得

$$\begin{cases} Q_r r d\theta dr + \frac{\partial}{\partial r}(rM_r) d\theta dr - M_t d\theta dr - \frac{\partial M_{rt}}{\partial \theta} d\theta dr = 0 \\ Q_t r d\theta dr + \frac{\partial M_t}{\partial \theta} d\theta dr - M_r d\theta dr - \frac{\partial}{\partial r}(rM_{rt}) d\theta dr = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

转换可得

$$\begin{cases} Q_r = -\frac{\partial M_r}{\partial r} - \frac{1}{r}(M_r - M_t - \frac{\partial M_{rt}}{\partial \theta}) = \\ -4(3+\nu) \frac{\partial D(r)}{\partial r} A_{40} r^2 - 32D(r) A_{40} r. \\ Q_t = -\frac{1}{r}(\frac{\partial M_t}{\partial \theta} - 2M_{rt}) + \frac{\partial M_{rt}}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

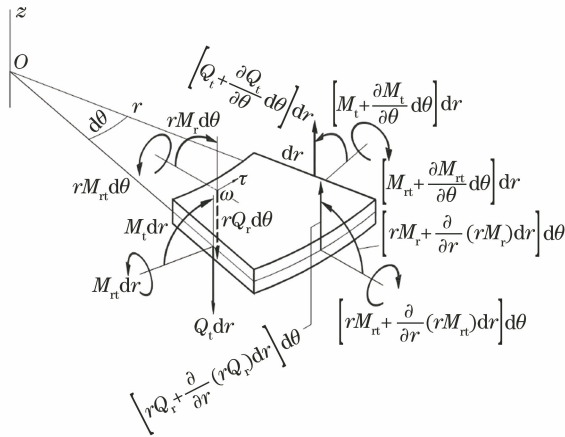


图 1 平衡状态下平板内部弯矩、扭矩以及应力示意图
Fig. 1 Diagram of internal bending moment, torque and stress of plate under equilibrium state

设最大镜片的半口径为 a , 镜面由简支边支撑, 在边缘处有 $M_r(a) = 0$ 。通过在镜片中心施加力与在边缘施加反作用力来产生形变, 当中心力 $F = \pi a^2 q$ (q 为施加中心力后的等效面力) 时, 则有

$$\pi a^2 q + 2\pi r Q_r = 0. \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式中, 其中 a, q, ν 和 A_{40} 都为常数, $D(r)$ 的二阶微分方程可表示为

$$D(r) = \frac{q}{16A_{40}(1-\nu)} (\rho^{-2} - \rho^{-\frac{8}{3+\nu}}), \quad (9)$$

式中: $\rho = r/a$ 。由(4)式有

$$t(r) = \left[\frac{3q(1+\nu)}{4A_{40}E} (\rho^{-2} - \rho^{-\frac{8}{3+\nu}}) \right]^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{3q(1-\nu^2)}{16A_{40}E} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left[\frac{4}{1-\nu} (\rho^{-2} - \rho^{-\frac{8}{3+\nu}}) \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (10)$$

令 $t(r) = t_0 T$, 其中 $t_0 = \left[\frac{3q(1-\nu^2)}{16A_{40}E} \right]^{\frac{1}{3}}$, 由此可获得厚度分布系数 T 与归一化半径 ρ 的关系为

$$T = \left[\frac{4}{1-\nu} (\rho^{-2} - \rho^{-\frac{8}{3+\nu}}) \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (11)$$

当镜面材料选择 1060 铝合金, 即 $\nu = 0.33$ 时, 采用(11)式计算在固定边缘与中心施力的条件下厚度分布随归一化半径的关系, 如图 2 所示。

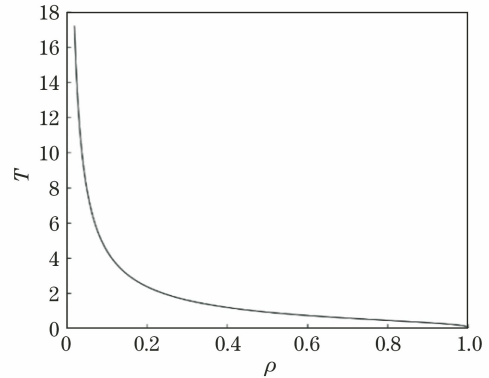


图 2 厚度分布与归一化半径的关系

Fig. 2 Relationship between thickness distribution and normalized radius

3 渐变厚度变形镜的模拟仿真

第 2 节利用弹性理论来求解变形镜的径向厚度分布, 本节结合有限元分析与光学面型拟合计算与评估方法, 以及采用光机一体化仿真方法来实现模型的受力仿真分析及其对像差补偿效果的评估。首先建立结构模型, 采用有限元软件对模型进行分析, 得到不同情况下镜面的节点位移信息; 再对位移信息通过数据处理软件进行 Zernike 多项式拟合以获得面型; 最后导入光学软件中, 获得其对光学系统像差的校正效果。

3.1 球差的模拟仿真

由(11)式计算出三阶球差的厚度分布 T , 可知当 $r = 0$ 时厚度为无穷大。考虑到可行性, 取 $r = 1 \text{ mm}$ 处的厚度为初始厚度。选择金属铝反射镜进行仿真, 设置 $a = 50 \text{ mm}$, $\nu = 0.33$, $E = 6.9 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。通过 MSC. Patran 软件和 Nastran 软件进行有限元分析, 可以获得反射镜在相对应的受力条件下的镜面形变。铝反射镜模型及有限元划分结果如图 3 所示。考虑到实际应用中施力的可操作性, 将模型的相互作用力互换, 在镜面边缘施加线力, 固定其中心以获得反作用力。固定变形镜中心区域的凸出顶端, 在边缘区域施加 $F = 5 \text{ N}$ 的线力,

图 4 为镜面变形后的面型云图。

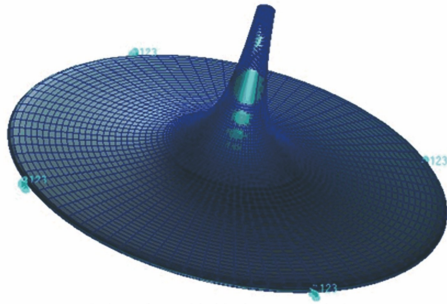


图 3 变形镜的有限元划分

Fig. 3 Finite element division of deformable mirror

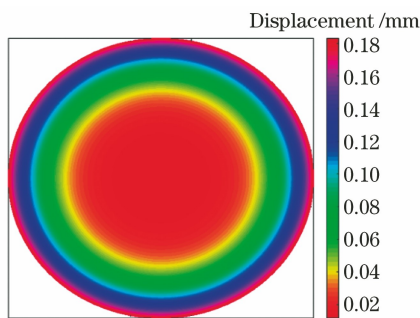


图 4 变形镜的面型云图

Fig. 4 Face shape cloud view of deformable mirror

由图 4 可得,面型云图为规则的同心圆环,变形量随着半口径的增大而增大,由颜色分布可看出变化趋势逐渐变陡。已知所求的面型变形量 z 与 r 呈四次方关系,即 $z = A_{40}r^4 = A_{40}(x^2 + y^2)^2$,将变形后的节点坐标 (x, y) 作曲面拟合,拟合方程 $z = 0.01234 + 4.514 \times 10^{-7} \times (x^2 + y^2)^2$,拟合近似度 $R^2 = 0.9991$,拟合均方根误差(RMSE)为 0.00147,说明拟合结果理想,其中 z 的常数项为平移项,对波面形状无影响, $A_{40} = 4.514 \times 10^{-7}$ 。

改变施加的边缘力大小,对节点数据进行拟合可以获得不同驱动力下的三阶球差系数 A_{40} ,其随边缘线力的变化如图 5 所示。由图 5 可知,随着施加线力的增大, A_{40} 呈线性增大,在材料的变形能力范围内,明确了力与所需形变之间的关系,所得结果为变形镜的驱动控制提供计算依据。

3.2 像散的模拟仿真

在实际光学系统中,变形镜倾斜放置可用于偏转光路,驱动产生球差的过程中将会引入一定的像散。像散的波前形状为马鞍形,通过在镜面两个正交直径的端部施加两对相反力可以使圆形基底变形,从而获得像散面型。

在已有变形镜模型的基础上,在镜面正交直径的端部分别施加 ± 1 N 的力,得到的镜面面型如图 6 所

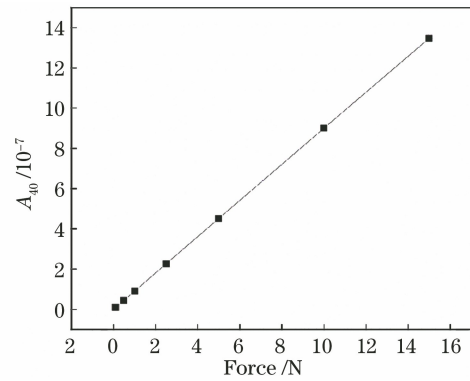


图 5 三阶球差系数 A_{40} 与线力的关系

Fig. 5 Relationship between third-order spherical aberration coefficient A_{40} and linear forces

示。从图 6 可以看到,整个镜面被分为 4 个区域,且两两相对区域的弯曲方向相同,两两相邻区域的弯曲方向相反,相对于中心的最大位移为 ± 0.005645 mm。

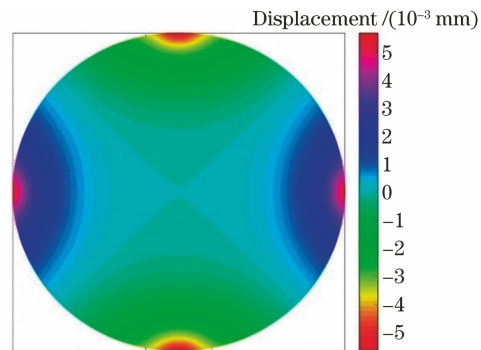


图 6 在正交直径的端部施加 ± 1 N 的力后的像散面型
Fig. 6 Astigmatic shape with force of ± 1 N applied to ends of orthogonal diameters

对镜面节点变形数据进行赛德尔像散模式的幂级数拟合,对三阶和五阶像散进行拟合,拟合方程 $z = a' + b(x^2 - y^2) + c[x^2(x^2 + y^2) - y^2(x^2 + y^2)]$,其中 b 为三阶像散系数, c 为五阶像散系数, a' 为常数项,拟合后得到 $a' = -1.982 \times 10^{-8}$, $b = 9.991 \times 10^{-7}$, $c = 7.923 \times 10^{-9}$,拟合近似度 $R^2 = 0.943$,RMSE 值为 0.00021,拟合偏差小。由此可知,通过在正交直径端部施加两对相反力的方法可以驱动模型产生三阶与五阶像散。

改变施加力的大小,可以获得 Zernike 多项式中像散系数随外力的变化曲线如图 7 所示,其中 Z_5 、 Z_{12} 、 Z_{21} 和 Z_{32} 项分别代表三阶、五阶、七阶和九阶的像散系数。从图 7 可以看到,随着外力的增大,4 种像散系数均线性变大,说明引入的各阶像散系数与施加外力呈线性关系。

3.3 与等厚度变形镜的对比

以球差面型为例,将渐变厚度变形镜与等厚度

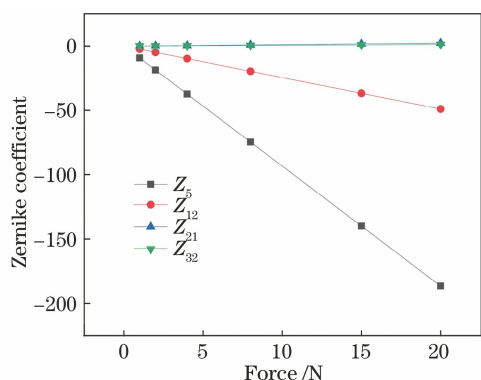


图 7 像散面型的 Zernike 项系数与外力的关系

Fig. 7 Relationship between Zernike term coefficient of astigmatic plane and external force

薄变形镜变形后的面型特点进行对比。设计 $a = 25 \text{ mm}$ 和厚度 $t = 1 \text{ mm}$ 的圆形金属铝薄板, 材料与上述的渐变厚度变形镜相同。

若以边缘驱动的方式对等厚度变形镜施加载荷, 即固定中心, 边缘施加 $F = 5 \text{ N}$ 的载荷, 则获得的面型如图 8 所示。

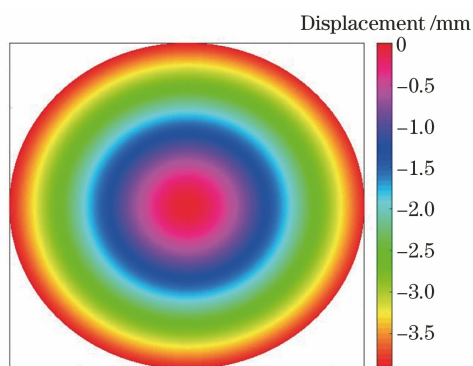


图 8 边缘施加 5 N 的载荷下等厚度变形镜的面型云图

Fig. 8 Surface shape cloud image of uniform thickness deformable mirror with 5 N load applied to edge

从图 8 可以看到, 等厚度变形镜在中心固定和边缘施力的情况下, 变形量随着半径的增大而增大, 其颜色变化趋势明显小于图 4。将图 8 与图 4 的节点数据进行 Zernike 拟合, 即转换为像差形式, 结果如表 1 所示。

从表 1 可以看到, 等厚度变形镜的离焦量大于自身的球差量; 渐变厚度变形镜的球差量远远大于自身其他的变形量, 即其余像差非常小, 可忽略不计。因此可见, 相比于等厚度变形镜, 渐变厚度主动变形镜补偿球差的效果有明显优势。

等厚度变形镜一般是通过分布在整个镜面上的多个促动器的共同作用来获取理想面型。目标形变球差可表示为 $z = 4.514 \times 10^{-7} \times (x^2 + y^2)^2$ 。由于

表 1 相同施力条件下等厚度变形镜与渐变厚度变形镜的像差对比

Table 1 Aberration comparison between deformable mirror with constant thickness and deformable mirror with variable thickness under the same applied force

Seidel aberration	Coefficient of deformable mirror with constant thickness /mm	Coefficient of deformable mirror with variable thickness /mm
Piston(A_{00})	0.1976327	0.0000421
Tilt(A_{11})	0.0540813	0.0000008
Focus(A_{20})	13.7429771	-34.7315700
Astigmatism(A_{22})	0.0000112	0.0000001
Coma(A_{31})	0.0012857	0.0000009
Spherical(A_{40})	-9.4068757	-424.8320600

渐变厚度变形镜为不等厚度变形镜, 所以其需要多个促动器共同作用。选择 57 个区域作为促动器的加载位置, 如图 9 所示。除中心区域外每个区域都是由 4 个单元构成, 为了避免促动器与镜面接触而导致印透效应, 使促动器作用在单个节点上, 即仅以划分区域的中心节点作为移动节点, 镜面节点的理论值由目标形变可以得到, 经有限元分析后镜面的面型云图如图 10 所示。

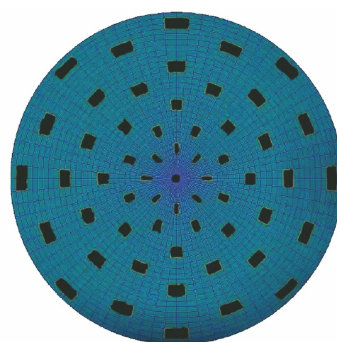


图 9 等厚度变形镜上加载的 57 个区域位置

Fig. 9 57 region positions loaded on deformable mirror with constant thickness

由图 10 可得, 对于多个促动器作用的等厚度薄变形镜, 其形变量在同一半口径下并不相同, 且随着半口径的增大, 差别更加明显, 可见促动器的排列方式严重制约着形变面型。即便促动器均匀分布, 在镜面上依旧无法避免应力集中效应以及实际中的印透效应, 从而导致镜面的面型与理想面型之间有一定的偏差, 只有不断改进促动器的排列方式及其与镜面的接触方式来降低影响。渐变厚度主动变形镜由于采用边缘施力的方式, 镜面区域没有多余的施

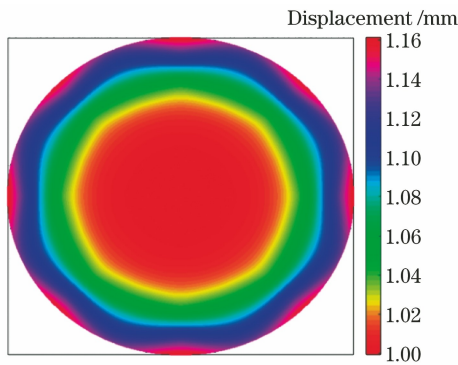


图 10 57 个节点移动产生的等厚度变形镜的位移云图

Fig. 10 Displacement cloud image of deformable mirror with constant thickness produced by movement of 57 nodes 力点,为此可以有效避免应力集中和印透两种效应,从而更容易获取理想面型。

4 变形镜实验

在理论计算模型的基础上,综合考虑加工和装配的可实现性,在 1~20 mm 半径之间采用渐变厚度设计,在中心区域以及边缘区域采用等厚度设计,设计的变形镜结构如图 11(a)所示。在外部厚圆环上施加均匀边缘载荷后可产生球差,在镜面正交直径的端部施力后可以获得像散面型。

驱动方法下设计的结构如图 11(b)所示,其顶端像散产生装置为一组共轭结构的刚性梁,通过圆杆连接到像散耳朵上,当两个刚性梁之间出现间隙时,则会产生一组大小相同且方向相反的力。球差产生装置为一包裹变形镜的空心圆柱,将其罩在厚圆环上,空心圆柱中心受力后,变形镜边缘受到整体向前的均匀力。

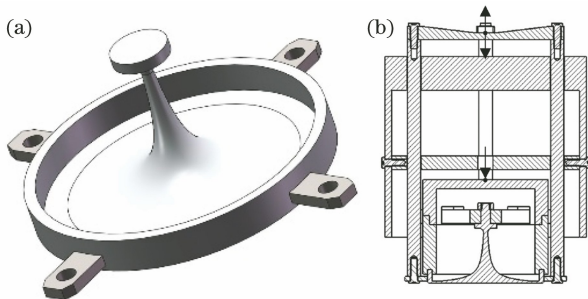


图 11 渐变厚度变形镜的结构。(a)变形镜;(b)整体结构

Fig. 11 Structure of deformable mirror with variable thickness. (a) Deformable mirror; (b) overall structure

变形镜的材料采用 1060 铝合金,其中 $\nu=0.33$ 和 $E=6.9 \times 10^4$ MPa;驱动与支撑结构采用钢材材料 1Cr13 合金,其具有优良的机械特性,可以保证在变形镜产生形变的过程中自身形变较小。加工后的变

形镜如图 12(a)所示,整体结构如图 12(b)所示,其中产生球差与像散的力分别由螺旋测微头 1 和螺旋测微头 2 驱动,驱动产生的位移量与施力成正比。

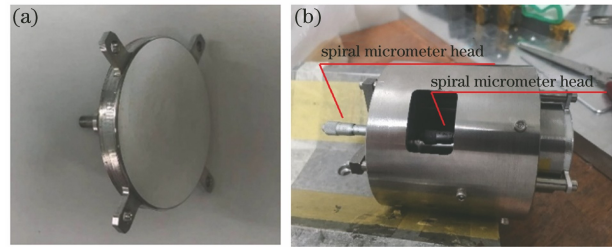


图 12 实际加工的变形镜试验件。(a)变形镜;(b)整体结构

Fig. 12 Actual machined deformable mirror test piece.

(a) Deformable mirror; (b) overall structure

4.1 面型精度实验

不同受力情况下的变形镜面型通过 ZYGO 干涉仪来采集,ZYGO 干涉仪的波长 $\lambda=632.8$ nm,光路如图 13 所示。变形镜正对 ZYGO 干涉仪,中间衰减片用于减弱光强,可清晰探测返回的光。通过变形镜下方的六维调节平台可以使干涉仪获得较好的干涉图像,经过处理分析可以获得面型数据。

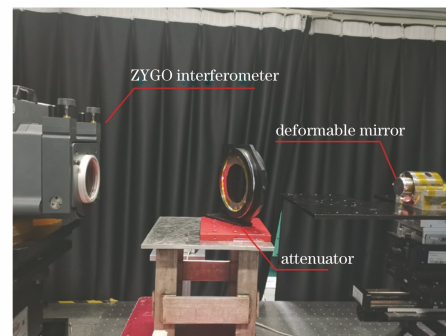


图 13 变形镜的实验光路

Fig. 13 Experimental optical path of deformable mirror

加工过程中,辅助工装胶粘后的超薄变形镜会产生离焦、像散与球差,如图 14(a)所示。由于变形镜本身可以补偿球差与像散,放宽变形镜的加工要求,即允许镜面存在加工残余误差,去除球差与像散后的加工残余误差如图 14(b)所示。

球差通过螺旋测微头 1 的施力来产生,以其初始读数为零,螺旋测微头相对于初始位置在不同位移 s 下的镜面面型如图 15 所示,对应的 Zernike 多项式中球差项与边缘位移量 s 的关系如图 16 所示。

由图 15 可知,随着螺旋测微头 1 与初始位置之间距离的增大,变形镜所产生的球差先用于补偿自身的初始球差,自身球差抵消后面型的均方根(RMS)由 0.143λ 降低至 0.093λ ,之后镜面产生反球差,峰谷(PV)值、RMS 值和球差大小一同随着位

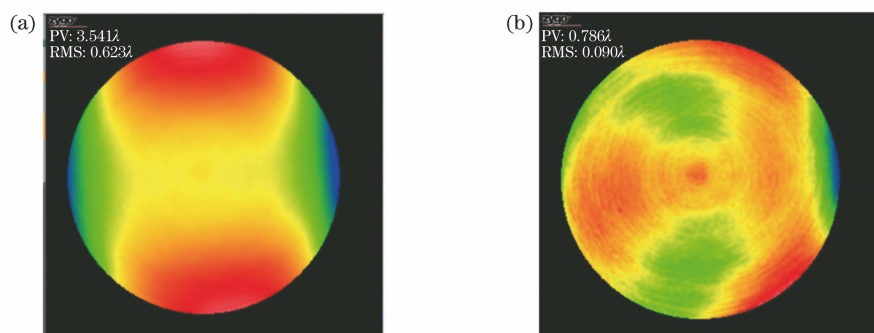


图 14 变形镜镜面在不同情况下的初始面型。(a)存在球差与像散；(b)去除离焦、球差和像散

Fig. 14 Initial surfaces of deformable mirror under different conditions. (a) Spherical aberration and astigmatism are existed; (b) defocus, spherical aberration, and astigmatism are removed

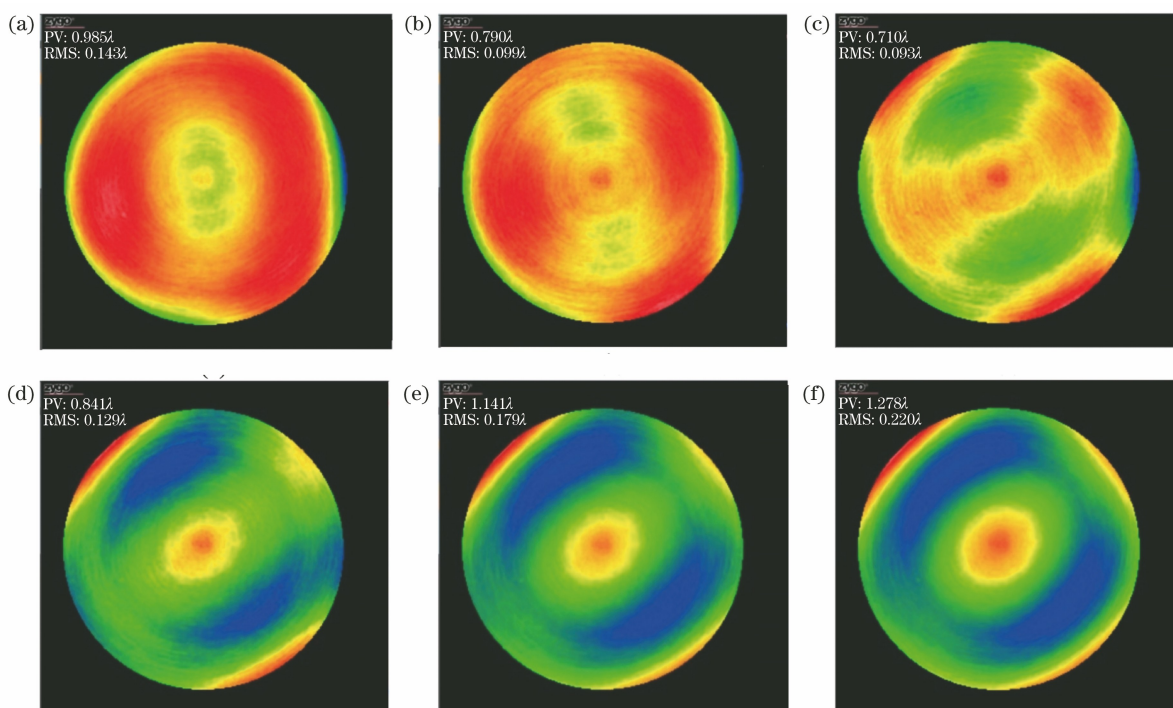


图 15 螺旋测微头相对于初始位置在不同位移 s 下的镜面面型。(a) $s=0$; (b) $s=0.12$ mm; (c) $s=0.18$ mm; (d) $s=0.23$ mm; (e) $s=0.28$ mm; (f) $s=0.32$ mm

Fig. 15 Mirror surface of helical micrometer head relative to initial position at different displacement s .

(a) $s=0$; (b) $s=0.12$ mm; (c) $s=0.18$ mm; (d) $s=0.23$ mm; (e) $s=0.28$ mm; (f) $s=0.32$ mm

移量的增大而增大。从图 15(c) 可以看到, 当 $s=0.18$ mm 时, 面型自带的球差基本校正完成, 其与图 14(b) 去除球差、像散和离焦后的残余面型接近, 由于球差被补偿, 所以面型的 PV 误差值降低了 10%。

由图 16 可知, Zernike 多项式中 Z_9 球差项与镜面边缘位移 s 之间可视为线性关系, 对其进行线性拟合, 公式为 $y=2.2172x-0.3227$, 拟合近似度 $R^2=0.987$, 说明数据具有较好的线性关系, 变形镜所产生的球差量与镜面边缘位移量呈线性相关。

控制尾部的螺旋测微头 2, 使得共轭的刚性梁

之间产生间隙 t' , 此时变形镜产生像散。不同间隙下的像散面型如图 17 所示。

从图 17 可以看到, 面型像散随着刚性梁之间间隙的增大而增大。由 ZYGO 干涉仪分析获得的像散 Zernike 系数随刚性梁间隙的变化曲线如图 18 所示。

从图 18 可以看到, Zernike 多项式中像散系数 Z_5 和 Z_6 都与共轭刚性梁间隙呈线性相关, 对它们之间的关系分别作线性拟合。 Z_5 项的线性拟合公式为 $y=0.1129x+0.2168$, $R^2=0.9991$; Z_6 项的线性拟合公式为 $y=0.0151x-0.2396$, $R^2=0.8829$ 。

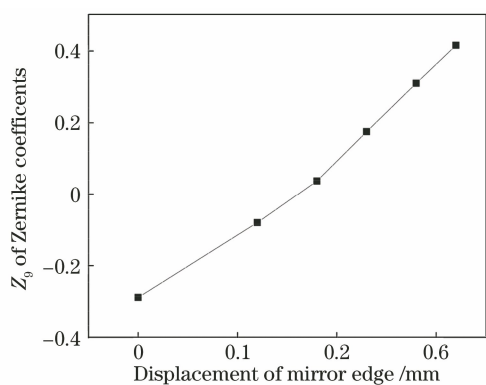


图 16 Zernike 多项式中 Z_9 项与镜面边缘位移的关系
Fig. 16 Relationship between Z_9 term in Zernike polynomial and displacement of mirror edge

综上可知,两者的线性拟合近似度较好,可认为镜面所产生的像散与间隙成正比。

由面型实验可以看出,实验结果与模拟仿真结果一致,变形镜可产生球差与像散,且球差量与像散量分别与其对应的螺旋测微头所施加力的大小成正比;变形镜所产生的像差可补偿自身的加工误差,这大大降低了加工难度。

4.2 系统像差补偿实验

将渐变厚度主动变形镜放入离轴两反光学系统中,测试其对系统像差的校正效果,完备的光学系统参数如表 2 所示。

实验装置由变形镜(平面镜)、无焦光学系统和干涉仪组成,实验光路如图 19 所示。首先,使无焦

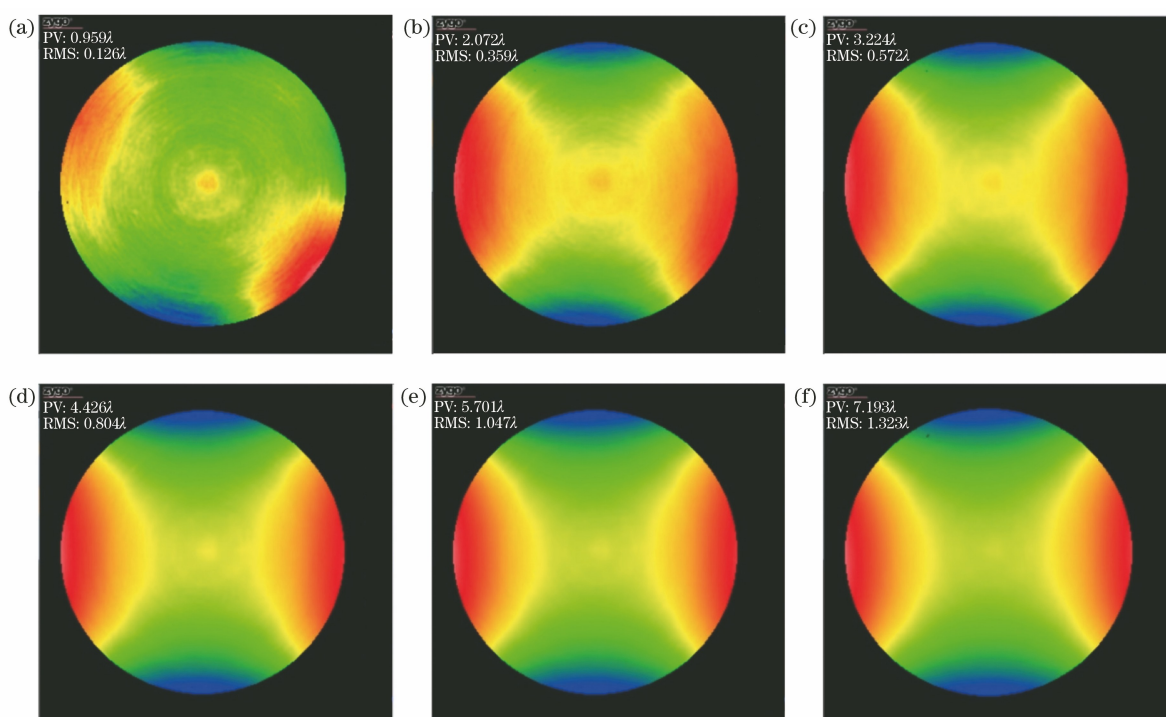


图 17 不同间隙下的像散面型。(a) $t'=0$; (b) $t'=0.05$ mm; (c) $t'=0.10$ mm; (d) $t'=0.15$ mm; (e) $t'=0.20$ mm; (f) $t'=0.25$ mm
Fig. 17 Astigmatic surfaces at different clearance. (a) $t'=0$; (b) $t'=0.05$ mm; (c) $t'=0.10$ mm; (d) $t'=0.15$ mm; (e) $t'=0.20$ mm; (f) $t'=0.25$ mm

表 2 补偿实验中离轴两反光学系统的参数

Table 2 Parameters of off-axis dual reflection optical system

Surface	Radius /mm	Conic	Type	Aperture /mm	Off-axis /mm
1	-480	-1	Mirror	60	96
2	-80	-1	Mirror	10	16
3	—	—	Deformable mirror	10	—

系统中两个非球面反射镜的间距发生变化以产生球差,平面镜自准后使用干涉仪来测试球差数据;再将平面镜替换成变形镜,通过微调螺旋测微头 1 来驱

动变形镜面型的变化以实现无焦系统球差的补偿。光学系统的波前质量随螺旋测微头 1 给予的位移 s 的变化如图 20 所示。

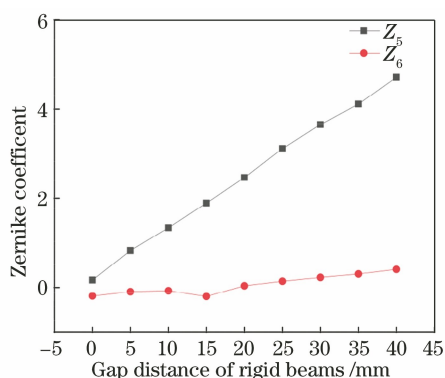


图 18 像散 Zernike 系数 Z_5 和 Z_6 与刚性梁间隙之间的关系

Fig. 18 Relationship between astigmatic Zernike coefficients Z_5 and Z_6 and gap distance of rigid beams

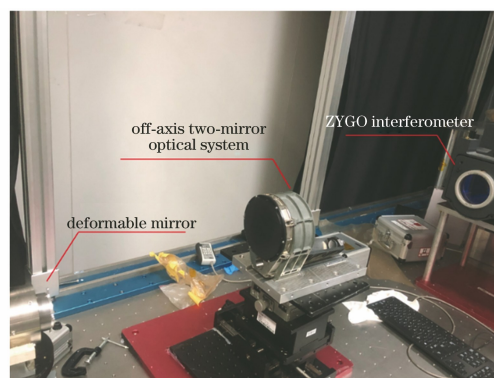


图 19 离轴两反光学系统球差补偿的实验光路

Fig. 19 Experimental optical path of spherical aberration compensation for off-axis dual reflection optical system

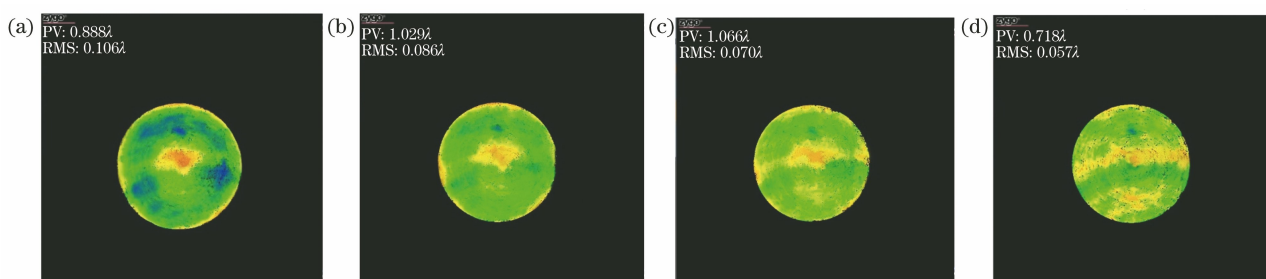


图 20 变形镜补偿后的球差波面变化图。(a) $s=0$; (b) $s=0.02$ mm; (c) $s=0.03$ mm; (d) $s=0.04$ mm

Fig. 20 Spherical aberration wave surface change diagram compensated by deformable mirror.

(a) $s=0$; (b) $s=0.02$ mm; (c) $s=0.03$ mm; (d) $s=0.04$ mm

从图 20 可以看到,经过变形镜补偿后,无焦系统的波面误差逐渐减小,系统的波像差 RMS 值由补偿前 0.106λ 减小至补偿后 0.057λ ,PV 值由 0.888λ 降低至 0.718λ ,系统的波像差 RMS 降低了 46.2%,PV 值降低了 19.1%。Zernike 多项式中的 Z_9 球差项由 0.204 降低至 0.008 ,几乎完全补偿,说明渐变厚度主动变形镜可以有效补偿光学系统的三阶球差,实验验证了渐变厚度主动变形镜具有补偿球差的能力,为渐变厚度主动变形镜在高分辨率空间相机中补偿球差提供了实验数据支撑。

5 结 论

本文针对有限资源条件下空间相机在轨像质的补偿方法,提出渐变厚度变形镜校正球差与像散的方案。从弹性力学理论和波前像差表达方式出发,推导出了用于三阶球差补偿的变形镜厚度分布函数和模型,从而确定变形镜的初始结构形式;开展了变形镜光机力仿真分析,采用固定镜面中心以及对边缘施加载荷的方法得到球差波前表面型的近似度 $R^2=0.9991$,像散波前表面型的拟合近似度 $R^2=$

0.943 ,驱动后的变形镜产生较好的球差与像散面型,且球差量与像散量分别与施加力成正比。对于球差和像散,提出采用两个促动器同时产生镜面球差与像散的方案,这可以减少促动器数量,降低驱动难度。通过无焦光学系统中搭建球差校正实验平台,采用干涉仪来检测变形镜面型性能以及对光学系统的像差校正能力。经过测试补偿后,系统波前误差的 RMS 值降低了 46.2%,波前误差的 PV 值降低了 19.1%,实现了球差的有效补偿。结果表明,补偿波前球差后的系统波前质量提升明显,为渐变厚度主动变形镜应用于星载相机提供了设计思路、方法以及实验数据支持。

参 考 文 献

- [1] Xu W, Piao Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on the Pleiades[J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 9-19. 徐伟, 朴永杰. 从 Pleiades 剖析新一代高性能小卫星技术发展[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 9-19.
- [2] Wilson R N. Active optics and the new technology telescope (NTT): the key to improved optical quality

- at lower cost in large astronomical telescopes [J]. *Contemporary Physics*, 1991, 32(3): 157-172.
- [3] Tyson R K. Principles of adaptive optics [M]. Boston: CRC Press, 2015.
- [4] Ke X Z, Wang X Y. Experimental study on the correction of wavefront distortion for vortex beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328018. 柯熙政, 王夏尧. 涡旋光波前畸变校正实验研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328018.
- [5] Yang Z F, Li W L, Peng T R, et al. Performance of closed-loop correction with hysteresis compensation for unimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0522001. 杨宗峰, 李文来, 彭泰然, 等. 具有迟滞补偿的单压电变形镜的闭环校正性能 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0522001.
- [6] Laslandes M, Hugot E, Ferrari M, et al. Mirror actively deformed and regulated for applications in space: design and performance [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091803.
- [7] Yuan J, Sha W, Ren J Y. Structure design of a deformable mirror used on space camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(1): 0122001. 袁健, 沙巍, 任建岳. 空间相机中变形镜的结构设计 [J]. *光子学报*, 2016, 45(1): 0122001.
- [8] Chen X D. Testing of a 9-points deformable mirror and its application in space camera system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1023001. 陈新东. 9 点促动变形镜性能测试及在空间相机中的应用研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1023001.
- [9] Lemaître G R. Introduction to optics and elasticity [M]// Lemaître G R. *Astronomical optics and elasticity theory*. Astronomy and astrophysics library. Heidelberg: Springer, 2009: 1-136.
- [10] Hugot E, Ferrari M, Lemaître G R, et al. Active optics theory: compensation of aberration using the single actuator principle [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7018: 70184I.
- [11] Laslandes M, Hugot E, Ferrari M. Active optics: deformable mirrors with a minimum number of actuators [EB/OL]. (2012-09-12) [2021-04-28]. <https://arxiv.org/abs/1209.2685>.
- [12] 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. 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.
- [13] Liu L H, Long Y, Cao F, et al. Simulation and calculation of low order aberration corrected by four-arm edge-driven deformable mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1012001. 刘李辉, 龙吟, 曹芬, 等. 4 臂边缘驱动变形镜校正低阶像差的仿真计算 [J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1012001.