

一种新型的变形镜促动器排布方式设计与分析

陈新东^{1,2} 郑立功¹ 张学军¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 对于薄反射镜面背部排布垂直于镜面的力促动器的变形镜,其原理可以采用微分方程表示。理论分析表明,这种变形镜要实现低阶误差的高精度有效校正,需要在变形镜的有效口径外排布一定数量的促动器。采用有限元建模和分析技术,对基于力的支撑校正方式的变形镜进行了分析,对比了 9 促动点不同支撑位置时变形镜对离焦、象散和彗差三种低阶像差的校正能力,设计了支撑点内圈 6 点(有 3 个固定点)位于有效口径边缘、外圈 6 点位于外边缘的排布方式,大大提高了变形镜对难于校正的彗差的校正能力。最后比较了波前校正和模态校正方式在这种新型排布下的不同。

关键词 自适应光学;连续镜面变形镜;促动器排布方式;有限元分析

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s116007

Design and Analysis of a Novel Actuator Topology of Deformable Mirrors

Chen Xindong^{1,2} Zheng Ligong¹ Zhang Xuejun¹

(¹ Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chanchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The deformation of a continuous facesheet DM with discrete push-pull actuators in the thin plate approximation is described by the differential equation. Analysis of the equation shows that to achieve a high quality correction of low-order aberrations, deformable mirrors should have some actuators positioned outside the correction aperture. By finite element analysis, the correcting abilities of defocus, astig and coma are compared. A novel design of 9 actuators positioned on the edge of aperture and mirror is proposed and optimized. The analysis results show that the new design improves the correcting abilities, especially for coma which is hard to correct. Finally the wavefront correction and modal correction methods are compared.

Key words adaptive optics; continuous facesheet deformable mirrors; actuator topology; finite element analysis

OCIS codes 110.1080; 330.4460; 230.3990

1 引言

变形镜(DM)能够精确的形成非球面面形,在成像系统、激光光学和天文学中有着重要的应用^[1~5]。这些应用中需要变形镜动态的形成高精度低阶像差面形。变形镜的实验表明,仅仅通过增加

孔径内部的促动器个数并不能完全的校正一些像差,这些低阶像差的精度受到促动器引起的高阶像差的影响。因此设计一种新型的、在孔径外排布促动器的方式实现变形镜的高精度像差校正能力具有重要的现实意义。

收稿日期: 2011-07-21; **收到修改稿日期**: 2011-09-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题。

作者简介: 陈新东(1982—),男,博士研究生,主要从事主动光学与自适应光学、光学加工检测等方面的研究。

E-mail: chenxd08@yahoo.cn

导师简介: 张学军(1968—),男,研究员,主要从事先进光学制造和空间光学技术等方面的研究。

E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

针对广泛应用的连续镜面、分立促动器的变形镜^[1,6~8],从理论上分析描述镜面在促动器作用下变形的微分方程表明,一些低阶像差不存在非零解,即从原理上这些像差不能由有效孔径内的促动器产生。因此需要在孔径外排布促动器。同时,一些研究也表明,影响变形镜精度的残差主要分布在孔径的边缘,采用子孔径能够提高变形镜的精度。根据这些分析设计了一种少量促动器的排布方式,将9个促动器点排布在孔径的边缘和孔径外。通过有限元分析,以变形镜对离焦、象散和彗差的校正能力为目标,对促动器的位置进行了优化。优化后的位置提高了变形镜对上述低阶像差特别是彗差的校正能力。最后,针对这种新型的变形镜,比较了模态校正和波前校正这两种控制校正方式的优劣。

2 理论分析

连续镜面、分立促动器变形镜的镜面变形 $\varphi(x, y)$ 可以由微分方程表示为^[6]

$$\Delta^2 \varphi(x, y) = p(x, y) / D, \quad (1)$$

式中 D 为镜面刚度, Δ 为拉普拉斯算子, p 为促动器产生的压力。各促动器的压力要满足系统的等静条件, 镜面变形要满足一定的边界条件。Zernike 多项式经常用来表示镜面的像差形式。采用极坐标时, Zernike 多项式可以表示为 $Z_n^{\pm m}(\rho, \theta)$ 。如果需要镜面产生某一像差, 即令

$$\varphi = Z_n^{\pm m}(\rho, \theta), \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式, 由极坐标下的拉普拉斯算子计算得

$$\Delta \varphi = \Delta Z = \frac{1}{\rho} \frac{\delta}{\delta \rho} \left(\rho \frac{\partial Z}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2}, \quad (3)$$

对于像差 $Z_n^{\pm n}(\rho, \theta) = \rho \frac{n \cos(n\theta)}{\sin(n\theta)}$ 和 $Z(n-2, \theta) = \rho \frac{n \cos(n-2)\theta}{\sin(n-2)\theta}$, 代入(3)式可得

$$\Delta \rho \frac{n \cos(n\theta)}{\sin(n\theta)} = n^2 \rho^{n-2} \frac{\cos(n\theta)}{\sin(n\theta)} - n^2 \rho^{n-2} \frac{\cos(n\theta)}{\sin(n\theta)} = 0, \quad (4)$$

$$\Delta \rho \frac{n \cos(n-2)\theta}{\sin(n-2)\theta} = n^2 \rho^{n-2} \frac{\cos(n-2)\theta}{\sin(n-2)\theta} - (n-2)^2 \rho^{n-2} \frac{\cos(n-2)\theta}{\sin(n-2)\theta} = 4(n-1) \rho^{n-2} \frac{\cos(n-2)\theta}{\sin(n-2)\theta}, \quad (5)$$

进而推得:

$$\Delta^2 \rho \frac{n \cos(n\theta)}{\sin(n\theta)} = 0, \quad (6)$$

$$\Delta^2 \rho \frac{n \cos(n-2)\theta}{\sin(n-2)\theta} = 0, \quad (7)$$

(6)和(7)式说明, 产生像差 $Z_n^{\pm n}(\rho, \theta) = \rho \frac{n \cos(n\theta)}{\sin(n\theta)}$ 和 $Z(n-2, \theta) = \rho \frac{n \cos(n-2)\theta}{\sin(n-2)\theta}$ 需要的促动器的力为零, 从原理上说镜面不能精确的产生这些像差。实际的变形镜之所以能够产生这些像差的面形, 原因在于(1)式是薄板近似理论, 实际中由于剪切形变等因素的

影响, 镜面反而能够生成一定的这些像差, 然而这些像差的产生往往需要更大的力, 难于校正。

3 孔径外的促动器排布方式设计和分析

根据上面理论分析的结论, 设计了一种将促动器排布在孔径外的促动器排布方式。为了分析这种变形镜的像差校正能力, 采用有限单元法进行了建模和分析。有限单元法^[9]是广泛应用于计算机辅助工程力、热分析的数值方法, 其基本原理为将一个连续的求解域分割为有限数量单元组成的组合体, 单元间的相互作用通过节点传递。通过这样的离散, 将原来具有无限自由度的连续变量微分方程和边界条件转换为只包含有限节点变量的代数方程组并用计算机求解。针对每一个单元选择试探函数进行函数逼近并在单元内完成积分计算。对整个求解域而言, 只要试探函数满足一定条件, 当单元尺寸缩小时, 有限元解收敛于实际的精确解。采用 Patran 对反射镜进行了建模, 调用 Nastran 进行计算。有限元模型如图 1 所示, 模型由 1056 个 shell 单元, 1105 个节点组成。

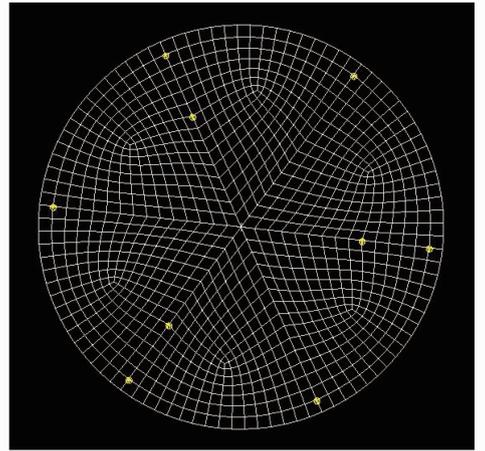


图 1 变形镜的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of deformable mirror

由于采用三重对称分布, 有限元分析得到的镜面响应函数分为三种(其他可旋转生成), 如图 2 所示。在 80% 口径内对响应函数的 Zernike 多项式拟合^[10~12], 镜面的响应主要为离焦、象散、彗差和三叶等低阶像差。变形镜的变形能力主要在于降低不同模式间的耦合。

通过有限元分析分别得到镜面各促动点的响应函数, 并组成响应函数矩阵 \mathbf{M} 。如果需要产生的镜面像差为 \mathbf{A} , 各促动器需要施加的力为 \mathbf{F} , 则有

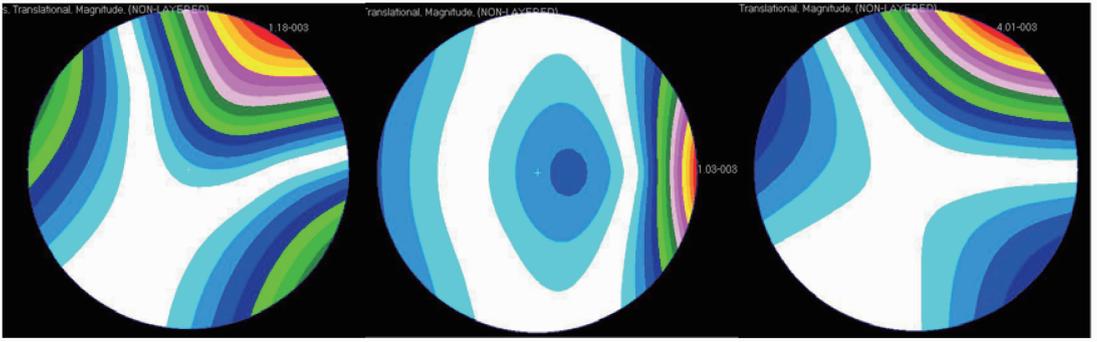


图 2 有限元分析得到的镜面响应函数

Fig. 2 Response functions of deformable mirror by finite element analysis

$$\mathbf{M} \times \mathbf{F} = \mathbf{A}$$

促动力的求解可以采用不同的几种解法,这里采用最小二乘法:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{M}^T \times \mathbf{M})^{-1} \times \mathbf{M}^T \times \mathbf{A}$$

求解出促动器的力,就可以得到镜面的产生的像差 \mathbf{S} 及其与理想像差的残差 \mathbf{E}

$$\mathbf{E} = R_{MS}(\mathbf{S} - \mathbf{A})$$

式中 R_{MS} 表示的是镜面残差的均方根(RMS)。

设镜面像差分别为离焦、象散和彗差,以产生这些像差的开环镜面残差为目标,对促动点的位置进行优化。首先将内圈的固定点设在有效孔径边缘(为 80%口径),改变外圈的促动点位置,分别进行有限元分析、建立响应函数、求解促动力和计算镜面响应残差。优化的结果如图 3(a)所示。计算结果表明,外圈半径的变化对离焦的校正能力影响比较小,在这种结构下离焦比较容易校正;产生象散的残差随着外圈半径的增加先减小,后增大,但减小的量比较大;产生彗差的残差随着外圈半径的增大而迅速下降。注意到彗差的 Zernike 项为 $\rho^3 \frac{\cos}{\sin}(3-2)\theta$,

仅有孔径内的促动器时难于校正,而分析的结果表明其残差随着外圈半径的增加而下降,因此选取外圈促动点位于镜面边缘,此时象散和彗差的残差与最佳值相差均小于 5%。考察内圈固定点半径的影响,固定外圈的促动点于镜面边缘,改变内圈的促动点位置,同样分别进行有限元分析、建立响应函数、求解促动力和计算镜面响应残差。计算结果如图 3(b)所示。产生离焦、彗差的残差均随着内圈半径的增加先减小后增大,产生象散的残差变化不大。在内圈半径为 0.86 时,彗差的残差最小,然而通过计算促动力发现,此时的促动力比半径为 0.8 时增大了 50%。综合镜面残差和促动力大小的比较和分析,对于 80%口径,最佳内圈促动点选择在有效孔径的边缘。设计的促动器排布方式为:支撑点内圈 6 点(有 3 个固定点)位于有效口径边缘、外圈 6 点位于外边缘。

以产生 500 nm RMS 为目标,该变形镜产生的像差及其残差分布如图 4 所示。

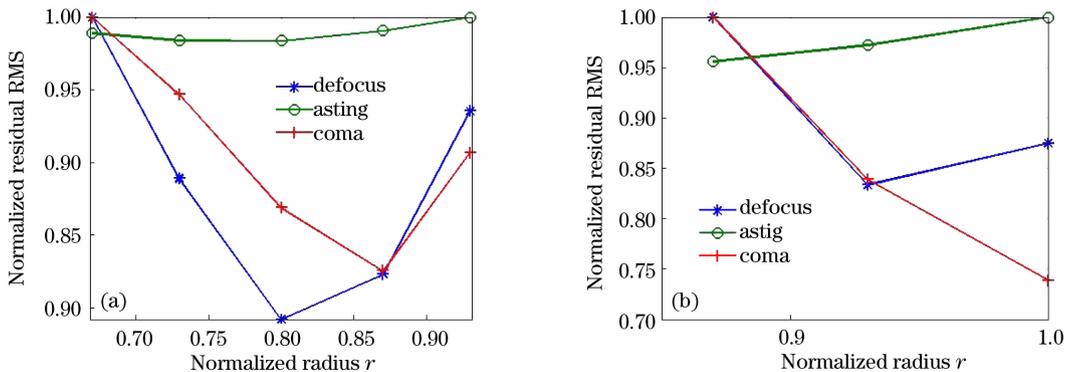


图 3 外圈(a)及内圈(b)支撑半径对镜面残差的影响

Fig. 3 Surface residual RMS versus supports of outer (a)- and inner (b)-ring

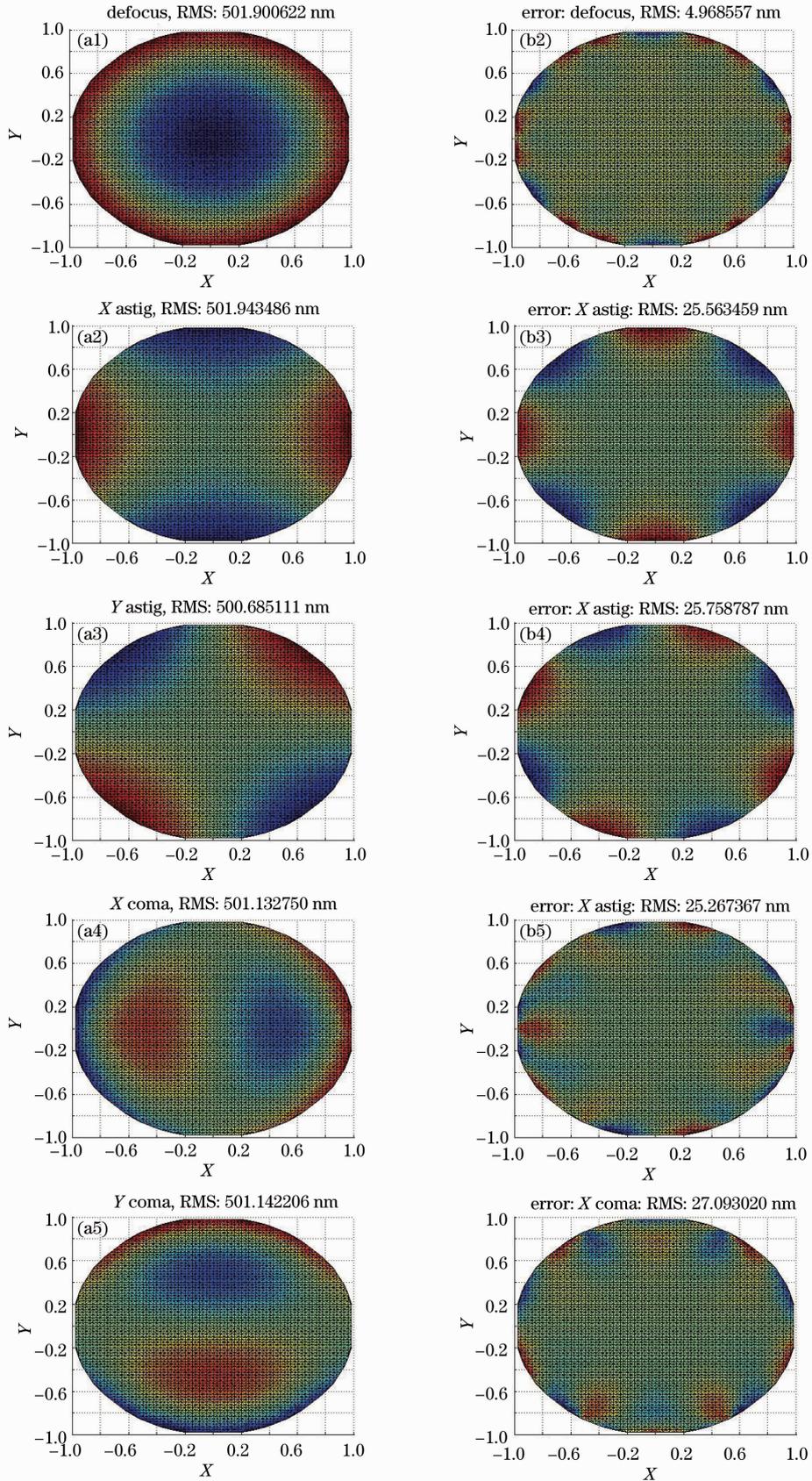


图 4 变形镜产生离焦、象散、彗差(a1)~(a5)及镜面残差分布(b1)~(b5)

Fig. 4 Defocus, astig, and coma (a1)~(a5) generated by DM and corresponding residual RMS (b1)~(b5)

为了和孔径内分布促动器的变形镜进行对比,依据文献[12]中的分布方式进行了建模和分析,如图5所示。以500 nm RMS为产生像差的目标,表1给出了比较的结果,其中变形镜1为我们设计的变形镜,变形镜2表示仅在有效孔径内分布促动器的变形镜。对于象散,这两种变形镜的镜面残差没有大的区别,校正能力基本相同;如果变形镜2采用子孔径其象散校正能力有所增强。对离焦和彗差,新排布方式的变形镜明显优于仅在有效孔径内排布的方式,特别是对于彗差这种难于校正的像差。计算结果也说明这种结构在全镜面校正时彗差也具有较大的残差,也说明了上述理论分析的正确性和设

计的合理性。

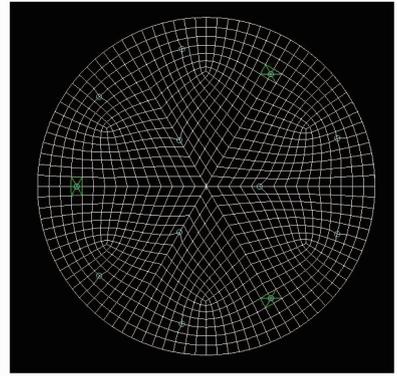


图5 促动器仅在有效孔径内分布的方式
Fig. 5 Finite model with all actuated points in the efficient aperture

表1 变形镜1和变形镜2的比较
Table 1 Compare of DM 1 and DM 2

| Aberration terms | Residual error /nm | | Residual error /nm | |
|------------------|--------------------|-----|--------------------|----------------|
| | DM1 | DM2 | DM1 (full) | DM2 (sub 0. 8) |
| Defocus | 5 | 71 | 31 | 48 |
| X astig | 26 | 26 | 38 | 16 |
| X coma | 27 | 217 | 113 | 116 |

4 控制校正方式的比较

波前控制和模态控制是变形镜中常用的两种方法。对于常用的变形镜结构形式,研究表明模态控制方法能够得到更好的效果,特别是校正低阶像差。针对这种新的结构形式变形镜,有必要对这两种控制方法的开环效果进行比较,以便选择最佳的控制方法。这两种方法的计算结果如下表2所示。波前

控制方法在彗差的产生中能取得更好的效果,但是最大促动力也增大很多。同时在计算中也发现,模态控制中促动力的计算受到Zernike拟合和计算精度的影响较大,存在的一定不稳定性;但是模态控制方法也具有计算速度快,占用资源少的优点。在下一步的实验中可以进一步比较这两种方法。

表2 波前控制和模态控制的比较

Table 2 Compare of wavefront- and modal-methods

| Aberration terms | Residual error RMS /nm | | Maximum force /N | |
|------------------|------------------------|-------|------------------|-------|
| | Wavefront | Modal | Wavefront | Modal |
| Defocus | 5 | 6 | 5.5 | 5.5 |
| X astig | 26 | 26 | 3 | 3 |
| X coma | 27 | 20 | 14 | 40 |

5 结 论

本文根据理论分析结果提出一种新的变形镜促动器排布方式。采用有限元法进行了建模、分析和优化。采用9点促动,变形镜能够产生高精度的离焦、象散和彗差,并且优于仅在孔径内排布促动器的结构。最后讨论了两种控制校正方法。

参 考 文 献

- 1 R. H. Freeman, J. E. Pearson. Deformable mirrors for all seasons and reasons [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(4): 582~588
- 2 Peter Kurczynski. Large amplitude wavefront generation and correction with membrane mirrors [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 509~517
- 3 Nicholas Devaney, Eugenie Dalimier. Correction of ocular and atmospheric wavefronts: a comparison of the performance of various deformable mirrors [J]. *Opt. Express*, 2008, **47**(35): 6550~6562

- 4 Brant M. Kaylor, Peter A. Roos. Novel MEMS deformable mirror for focus control and aberration correction [C]. SOA IS 2010, IWD2
- 5 Curtis Vogel, Glenn Tyler. Modeling and parameter estimation for point-actuated continuous-facesheet deformable mirrors [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(11): 56~63
- 6 Gleb Vdovin, Oleg Soloviev. Correction of low order aberrations using continuous deformable mirrors[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 2859~2866
- 7 B. R. Oppenheimer, D. Palmer. Investigating Xinetics Inc. Deformable mirror [C]. *SPIE*, 1997, **3126**: 569~579
- 8 T. Bifano. Mems wavefront correctors; electromechanical theory and recent performance advances [C]. Optical Society of America, 2007, ATuD1
- 9 R. Winsor, A. Sivaramakrishnan. Finite element analysis of low cost membrane deformable mirrors for high order adaptive optics [C]. *SPIE*, 1999, **3785**: 160~167
- 10 Ning Yu, Yu Hao. Experimental research on spatial fitting capability to Zernike aberrations of 20-element bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1756~1760
 宁 禹, 余 浩. 20单元双压片变形镜对 Zernike 像差空间拟合能力实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1756~1760
- 11 Chang Liping, Shen Weixing, Lin Zunqi. Algorithm for digital wavefront fitting based on singular value decomposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1676~1680
 常丽萍, 沈卫星, 林尊琪. 基于奇异值分解的数字波前拟合算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1676~1680
- 12 L. Arnold. Optimized axial support topologies for thin telescope mirrors[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(2): 567~574

栏目编辑: 胡 冰