

61 单元音圈电机变形镜波前拟合能力分析

孙晓林^{1, 2, 3} 官春林^{1, 2} 周虹^{1, 2}

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ²中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 变形镜作为自适应光学系统的核心器件,波前拟合能力是其主要性能参数。设计了三角形、正方形、环形 3 种驱动器排布方案,采用 Ansys 建模提取了驱动器影响函数。对比仿真分析了设计方案对低阶基元像差及其 1000 帧组合像差的拟合能力。结果表明:环形排布为非接触、力驱动器的最佳排布方案,对组合像差的拟合残差均方根值平均值为 $0.016 \mu\text{m}$;环形排布变形镜对离焦和像散峰谷值分别大于 $30 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m}$ 时均有很好的拟合能力。分析了单驱动器失效对变形镜波前拟合能力的影响,结果表明,驱动器失效对音圈电机变形镜拟合能力影响甚小,拟合残差均方根值变化小于 $0.01 \mu\text{m}$ 。

关键词 光学设计; 自适应光学; 畸变校正; 变形镜; 音圈电机

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s122006

Wave-Front Fitting Capability Analysis of 61-Element Voice Coil Deformable Mirrors

Sun Xiaolin^{1,2,3} Guan Chunlin^{1,2} Zhou Hong^{1,2}

¹ *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

² *Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

³ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract Deformable mirrors is the key element for adaptive optics system, and wave-front fitting capability is the main parameter. The Ansys software is used to calculate the actuator's influence function. Fitting capability is compared, which is based on the three arrangement schemes (diamond arrangement, square arrangement, annular arrangement) fitting low order primitive aberrations and 1000 frames combination of Zernike aberration. Simulation results show that annular arrangement is the best actuator arrangement schemes of contactless force actuator deformable mirror, and the average root-mean-square value of fitting combination aberration is $0.016 \mu\text{m}$; annular arrangement deformable mirror also has a good fitting capability to the defocus and astigmatism when its peak valley value is larger than $30 \mu\text{m}$ and $15 \mu\text{m}$. The influence of a broken actuator on the deformable mirror fitting capability is analyzed. Results show that it has little influence on the deformable mirror fitting capability, its root-mean-square value increment is below $0.01 \mu\text{m}$.

Key words optical design; adaptive optics; aberration correction; deformable mirror; voice coil motor

OCIS codes 220.1000; 220.4880; 110.1080

1 引 言

变形镜(DM)作为自适应光学系统的核心器件,其对像差的校正能力直接关系到自适应光学系统的性能。随着对系统要求的逐步提高,目前常用的压电陶瓷变形镜满足不了系统大行程的需求,组合变形镜自适应光学系统^[1]、基于音圈电机变形次镜自适应光学系统^[2]等新系统被提出。

音圈电机驱动技术具有明显的大行程优势,自 1993 年 Piero Salinari 提出以来^[3],已成功研制出多块变形次镜^[2],并在自适应光学系统中进行了首次观测,取得了良好的观测效果^[4-6]。目前该技术主要应用于大

收稿日期: 2015-01-23; 收到修改稿日期: 2015-03-02

作者简介: 孙晓林(1989—),男,硕士研究生,主要从事能动光学器件方面的研究。E-mail: jssunxl@126.com

导师简介: 官春林(1965—),男,研究员,主要从事能动光学器件方面的研究。E-mail: clguan@ioe.ac.cn

型望远镜的次镜中。

本文从变形镜性能的主要参数指标——拟合能力仿真分析着手,分析音圈电机变形镜技术在组合变形镜系统中的可行性和应用范围,为后续的器件研制提供理论导向。

2 61 单元音圈电机变形镜三维建模

延用常规压电陶瓷变形镜驱动器的排布思路,设计了音圈电机变形镜驱动器三角形、正方形、环形 3 种排布方案,如图 1 所示。三种方案的镜面厚度均为 2 mm,驱动器最小间距均为 30 mm,镜面直径均为 300 mm。由于音圈电机为非接触驱动器,故将模型镜面支撑方式设计为环形支撑,这可以将变形镜加工、装配后的原始大像差控制在以离焦为主。图 1 中环形斜线区域为环形支撑位置。

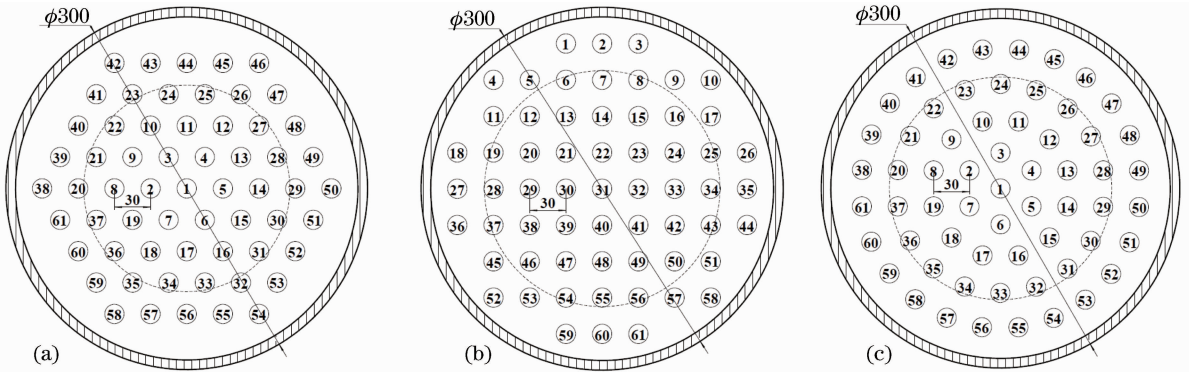


图 1 61 单元变形镜驱动器 3 种排布方案。(a)三角形排布;(b)正方形排布;(c)环形排布

Fig. 1 Three actuator arrangement schemes of 61-element DM. (a) Diamond arrangement; (b) square arrangement; (c) annular arrangement

在 Solidworks 中建立了三种排布方案的变形镜三维模型,模型使用的音圈电机原型为定制的 LAC8-001,其主要参数如表 1 所示,为观察结构内部,将环形支撑做了隐藏处理,如图 2 所示。由于音圈电机变形镜的结构较为复杂,为便于仿真计算,建模时,将模型做了适当简化处理,模型中将其定子部分省去,动子采用等质等体的空心圆柱代替线圈。

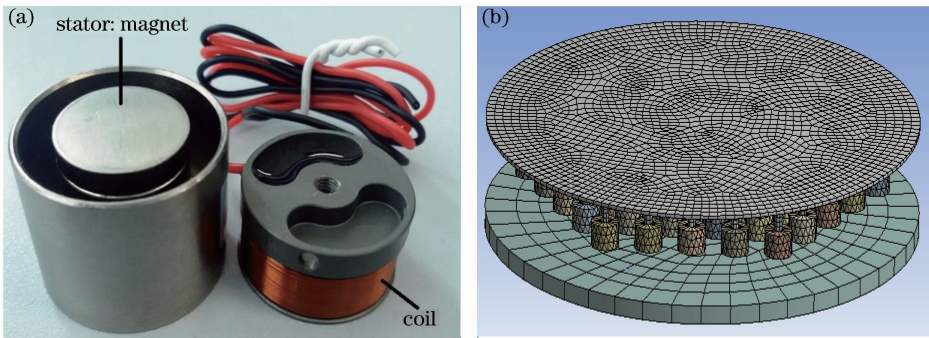


图 2 61 单元三角形排布变形镜。(a)音圈电机驱动器;(b)三维模型

Fig. 2 61-element diamond arrangement DM. (a) Voice coil actuator; (b) three-dimensional model

表 1 音圈电机参数

Table 1 Main parameters of voice coil motor

Weight of coil assembly /g	Motor diameter /mm	Motor height /mm	Peak force /N	Transmission shaft diameter /mm
8	20	26.2	8	5

3 变形镜驱动器影响函数计算

变形镜的影响函数计算通常有公式法和有限元分析法两种,公式法中的参数需由实验测试得到,故其适

合于变形镜研制成功后的后续系统研究中,且一般仅用在驱动器规则排布变形镜中;有限元分析法是通过仿真实验得到驱动器的影响函数,该方法不受驱动器排布方法的影响,且得到的影响函数更精确,它是变形镜初期设计的重要方法,本文也采用此方法。

将三维简化模型导入到 Ansys 有限元分析软件中,对各驱动器做静力学结构分析得到各驱动器的影响函数,仿真使用到的材料参数如表 2 所示,三角形排布变形镜的部分驱动器影响函数如图 3 所示。由图 3 易发现由中心(1#)向边缘(20#)驱动器影响函数最大位移量逐渐减小,实物设计时可考虑边缘选择大功率音圈电机。

表 2 变形镜材料参数
Table 2 Material parameters of DM

Component	Materials	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio	Density /(10^3 kg/m^3)
Mirror, annular support	K4 glass	71	0.21	2.5
Transmission shaft	Aluminium alloy	71	0.33	2.7
Coil	Cu	12.3	0.35	8.9
Base plate	Steel	210	0.269	7.85

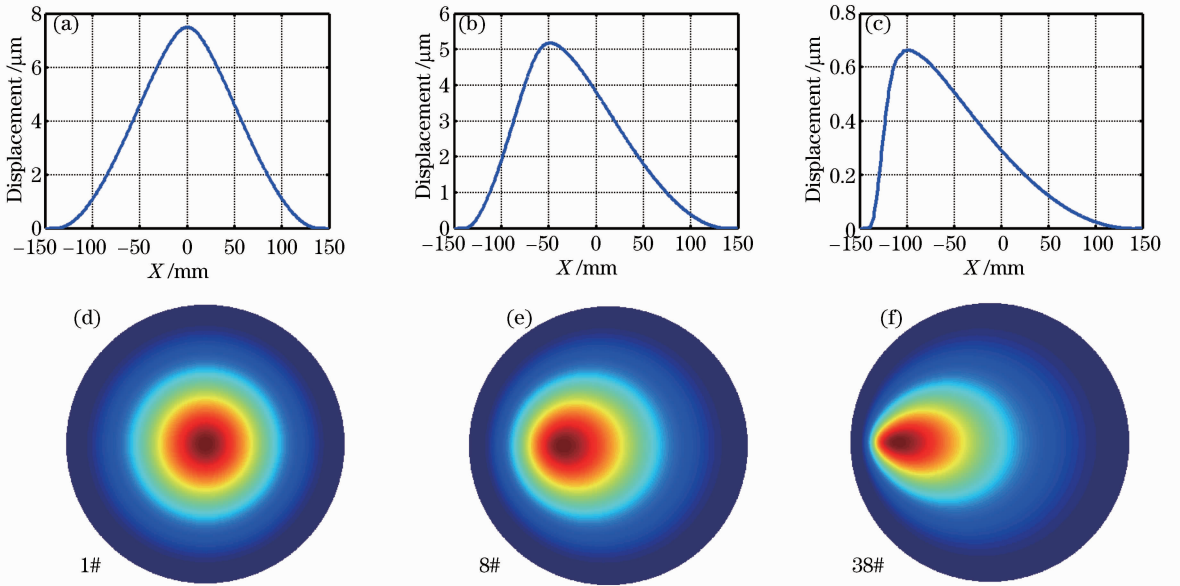


图 3 61 单元三角形排布变形镜部分驱动器影响函数

Fig. 3 Part actuators influence function of 61-element diamond arrangement DM

3 变形镜波前拟合能力分析

3.1 波前拟合基本原理^[7]

变形镜工作时,由其引入的校正面形变化 $m(x,y)$ 可用各个驱动器影响函数 $V_j(x,y)$ 的线性组合表示:

$$m(x,y) = \sum_{j=1}^N u_j V_j(x,y), \quad (1)$$

式中 u_j 为第 j 个驱动器上输出的力, $V_j(x,y)$ 为第 j 个驱动器影响函数, N 为驱动器个数。设任一畸变波前表示为 $\phi(x,y)$, 则使用变形镜来拟合畸变波前:

$$\phi(x,y) = \sum_{j=1}^N u_j V_j(x,y) + E(x,y), \quad (2)$$

式中 $E(x,y)$ 为波前拟合残差小量。(2) 式两边同时乘以某一个驱动器影响函数 $V_1(x,y)$ 并在单位圆 S 上积分平均, 得到方程:

$$S^{-1} \int_S \phi(x,y) V_1(x,y) dx dy = S^{-1} \int_S \left[\sum_{j=1}^N u_j V_j(x,y) + E(x,y) \right] V_1(x,y) dx dy, \quad (3)$$

可以得到:

$$C_{zv} = C_v v + \varepsilon, \quad (4)$$

$$C_{zv}(i) = S^{-1} \int_S V_i(x, y) \phi(x, y) dx dy, \quad (5)$$

$$C_v(i, j) = S^{-1} \int_S V_i(x, y) V_j(x, y) dx dy, \quad (6)$$

式中 C_{zv} 为驱动器影响函数与畸变波前间的相互关系矩阵, C_v 为驱动器影响函数间的耦合矩阵, 为对称阵可逆, ε 为拟合残差向量。(4)式的最小方差解为:

$$v^* = C_v^{-1} C_{zv}. \quad (7)$$

则拟合残余相位可表示为:

$$E(x, y) = \int_S \left[\phi(x, y) - \sum_{j=1}^N v_j^* V_j(x, y) \right] dx dy. \quad (8)$$

定义拟合误差(FE)为拟合残余相位的均方根(RMS)与拟合对象均方根的比值, f_E 值越小, 表明拟合能力越强。

$$f_E = \left\{ \int_S \left[\phi(x, y) - \sum_{j=1}^N v_j^* V_j(x, y) \right]^2 dx dy \right\}^{1/2} / \left\{ \int_S [\phi(x, y)]^2 dx dy \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

3.2 对低阶组合像差的拟合能力分析

在大气湍流引起的光波波前畸变中, 低频成分占绝大多数, 前 10 项泽尼克表示的像差占全部光波畸变误差的 96.11%^[8], 而音圈电机变形镜的应用目标是校正系统中的低频、大峰谷值像差部分。由于倾斜像差一般由倾斜镜单独校正, 故可选择泽尼克的第 3 项至第 10 项随机组合生成 1000 帧 RMS 为 1 μm 、平均峰谷(PV)值为 3.25 μm 的相位作为拟合对象分析变形镜的波前拟合能力。

3.2.1 三种排布方式有效孔径的选取

变形镜在实际工作时, 通常不是利用整个镜面产生目标相位, 而是截取一个拟合目标最佳的孔径作为变形镜工作的有效孔径。实际工程中, 有效孔径一般在系统方案设计时就已确定, 变形镜设计者依据给定有效孔径和拟合指标设计变形镜。在对变形镜波前拟合能力分析前, 首先仿真出各排布方案的最佳拟合有效孔径。由于仿真模型为力驱动器变形镜, 拟合过程中, 如果拟合效果虽好, 但需求电机输出力超出电机的最大输出, 系统将失效, 所以将拟合残差 RMS 值与拟合时各驱动器的平均推力(MF)的乘积作为求解有效孔径的评价指标, 即 $R_{MS} \times M_F$ 。

在不同有效孔径下, 分别用 3 种排布方式对 1000 帧随机相位进行了仿真拟合。拟合结果如图 4 所示, $R_{MS} \times M_F$ 值为 1000 帧拟合统计平均值, 为便于观察分析, 对其进行了归一化处理。由图可以得到三角形、正方形和环形 3 种排布方式的最佳有效孔径分别为 171, 195, 186 mm。

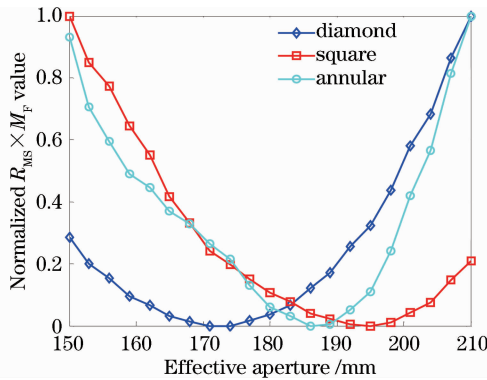


图 4 不同有效孔径下 1000 帧随机相位拟合平均 $R_{MS} \times M_F$ 值

Fig. 4 Average $R_{MS} \times M_F$ value of 1000 frames rand phase fitting with different effective aperture

3.2.2 波前拟合能力对比分析

对于常规的压电陶瓷变形镜, 驱动器三角形排布方式为其最优的排布策略。为了获得非接触力驱动变

形镜的驱动器最佳排布方式,在各方案最佳拟合孔径条件下,仿真分析了三种排布方式对 1000 帧随机相位的拟合能力,拟合结果统计平均值如表 3 所示。由表易知:环形排布主要的考量指标 $R_{MS} \times M_F$ 最小,故驱动器环形排布为非接触力驱动的最优排布方案,主要由于环形支撑下,环形排布所有驱动器影响函数一致性较好;设计的环形排布 61 单元音圈电机变形镜模型对前 10 项 RMS 为 $1 \mu\text{m}$ 的泽尼克组合像差有很好的拟合能力;方形排布最大推力和平均推力均较大,分析发现是因为方形排布方案边缘驱动器离环形支撑较近;结合电机最大推力参数,变形镜可校正峰值大于 $8 \mu\text{m}$ 的低频混合像差,且拟合残差的 RMS 可以控制在 $0.05 \mu\text{m}$ 。

表 3 最佳拟合孔径下三种排布方案拟合能力对比

Table 3 Comparison of three arrangement schemes fitting capability with best fitting aperture

Actuator distributing	Fitting residual RMS / μm	Max force /N	Mean force /N	$R_{MS} \times M_F /(\mu\text{m} \cdot \text{N})$
Diamond	0.0145	6.7052	1.1115	0.0184
Square	0.0359	74.5356	5.5071	0.2151
Annular	0.0158	2.8346	0.9204	0.0162

3.3 对低阶基元像差的拟合能力分析

在实际工程中,会遇到个别低阶大 PV 值基元像差占像差主要部分的光学系统,因此有必要分析所设计的 61 单元环形排布变形镜对低阶基元像差的拟合能力。

为了了解变形镜对某一特定基元像差的拟合能力,仿真分析了不同基元像差的最佳拟合有效孔径及最大推力为 8 N 时变形镜的最大拟合能力,最佳有效孔径的选取是作者对比不同拟合有效孔径下的拟合残差和拟合对象 PV 值综合考虑选取的。拟合对象利用泽尼克多项式生成,如图 5 所示。仿真结果如表 4 所示。由表 4 易知 61 单元环形排布变形镜对离焦、像散、彗差、三叶草、球差的最大拟合 PV 值可分别达到 65, 15, 11, 13, $10 \mu\text{m}$ 。

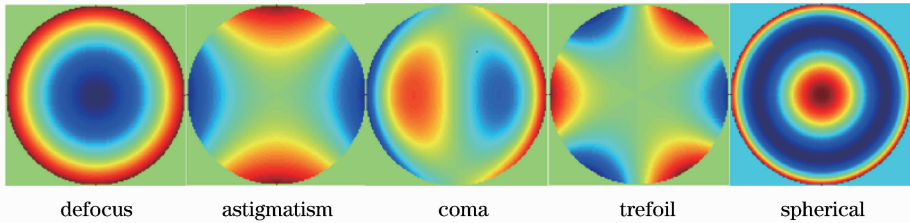


图 5 低阶基元像差

Fig. 5 Low order primitive aberration

表 4 最大推力为 8 N 时,环形排布变形镜对基元像差拟合结果

Table 4 Results of annular arrangement DM fitting low order primitive aberration when max drive force is 8 N

Aberration	Fitting valid aperture /mm	Aberration RMS / μm	Aberration PV μm	Residual RMS / μm	Mean force /N	Fitting error
Defocus	264	35.91	66.30	0.71	2.97	0.0199
Astigmatism	207	6.14	15.81	0.11	2.59	0.0178
Coma	222	3.86	11.52	0.40	2.90	0.1036
Trefoil	213	4.55	13.70	0.17	2.69	0.0372
Spherical	213	6.07	10.86	0.66	5.33	0.1087

表 5 拟合有效孔径 207 mm 及最大推力为 8 N 时,环形排布变形镜对基元像差拟合结果

Table 5 Results of annular arrangement DM fitting low order primitive aberration when fitting valid aperture is 207 mm and max drive force is 8 N

Aberration	Aberration RMS / μm	Aberration PV / μm	Residual RMS / μm	Mean force /N	Fitting error
Defocus	16.87	31.15	0.24	4.27	0.0140
Astigmatism	6.14	15.81	0.11	2.59	0.0178
Coma	3.36	10.02	0.16	2.70	0.0473
Trefoil	4.46	13.42	0.11	2.64	0.0255
Spherical	4.87	8.72	0.42	4.98	0.0853

然而系统实际工作时,变形镜的有效拟合孔径不能随拟合对象实时调整,为此分别选取有效孔径为 207,213,222 mm,仿真分析了驱动器最大推力为 8 N 时 61 单元环形排布变形镜对各基元像差的拟合能力,拟合结果如表 5 至表 7 所示。由三个表的数据易知:1)三个有效孔径下,变形镜对低阶大 PV 值基元像差均有较好的拟合能力;2)随着拟合有效孔径的增大,对各基元像差的拟合误差均逐渐增大。

表 6 拟合有效孔径 213 mm 及最大推力为 8 N 时,环形排布变形镜对基元像差拟合结果

Table 6 Results of annular arrangement DM fitting low order primitive aberration when fitting valid aperture is 213 mm and max drive force is 8 N

Aberration	Aberration RMS / μm	Aberration PV / μm	Residual RMS / μm	Mean force /N	Fitting error
Defocus	19.32	35.67	0.37	4.46	0.0194
Astigmatism	6.11	15.73	0.16	2.65	0.0270
Coma	3.58	10.70	0.24	2.78	0.0670
Trefoil	4.55	13.70	0.17	2.69	0.0372
Spherical	6.07	10.86	0.66	5.33	0.1087

表 7 拟合有效孔径 222 mm 及最大推力为 8 N 时,环形排布变形镜对基元像差拟合结果

Table 7 Results of annular arrangement DM fitting low order primitive aberration when fitting valid aperture is 222 mm and max drive force is 8 N

Aberration	Aberration RMS / μm	Aberration PV / μm	Residual RMS / μm	Mean force /N	Fitting error
Defocus	23.82	43.98	0.67	4.83	0.0282
Astigmatism	5.96	15.33	0.28	2.76	0.0464
Coma	3.86	11.52	0.40	2.90	0.1036
Trefoil	4.60	13.84	0.28	2.77	0.0615
Spherical	8.58	15.36	1.23	6.08	0.1428

3.4 驱动器失效对变形镜波前拟合能力的影响分析

对于压电陶瓷驱动变形镜,镜面与驱动器是固定连接,个别驱动器失效时,由于失效驱动器的牵拉作用,将会对变形镜局部校正能力产生较大的影响,而对于非接触音圈电机驱动而言,个别驱动器的失效对变形镜校正能力的影响较小。以 61 单元环形排布音圈电机变形镜为仿真模型,将 3.2 节的 1000 帧随机相位作为拟合对象,把拟合误差、拟合最大推力需求、平均推力需求等参数变化作为影响分析标准,定量分析驱动器失效对非接触力驱动变形镜校正能力的影响。由于驱动器呈对称分布,如图 6 所示,故分析时仅需选取 1[#]、2[#]、8[#]、20[#]、21[#]、38[#]、39[#] 驱动器分别失效。

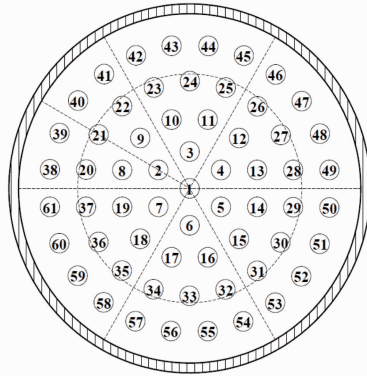


图 6 变形镜驱动器分布

Fig. 6 Actuator arrangement of DM

拟合仿真结果如图 7 所示。由图 7(a)知:个别驱动器失效对非接触力驱动变形镜的波前拟合能力影响甚小,拟合残差 RMS 变化小于 0.01 μm ,其中外圈驱动器失效影响稍大些(20[#]、21[#]、38[#]、39[#]);有效孔径

附近内(20[#]、21[#])驱动器失效影响大于有效孔径外的驱动器(38[#]、39[#])。由图 7(b)知:个别驱动器的失效没有对其他驱动器产生较大的影响,需求平均推力基本不变,最大推力略微增加。

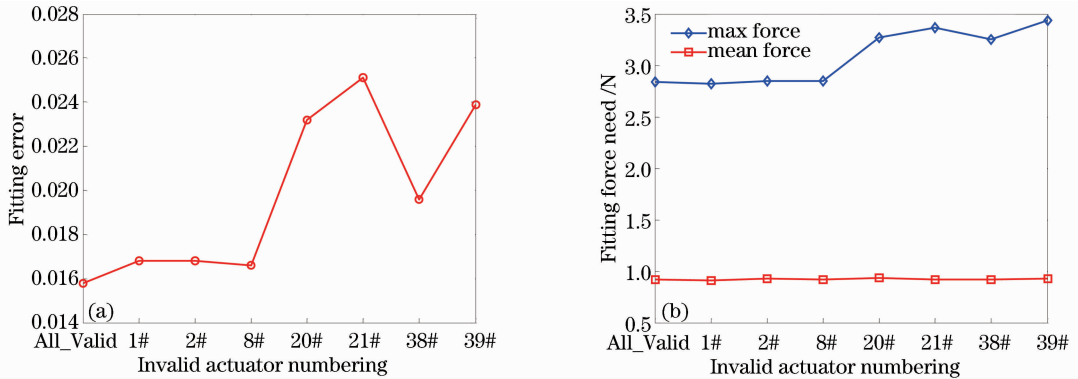


图 7 个别驱动器失效对变形镜拟合能力的影响。(a) 拟合残差 RMS; (b) 拟合所需推力

Fig. 7 Influence on DM fitting capability with a broken actuator. (a) Fitting error; (b) fitting force needed

4 结 论

对比分析了最佳拟合孔径下的 3 种方案对 1000 帧随机相位的拟合能力,得出环形排布为非接触力驱动器变形镜的最佳排布方案。设计的 61 单元环形排布变形镜对前 10 项低阶组合像差有很好的拟合能力,拟合最大 PV 值可达 $8 \mu\text{m}$;当基元像差离焦和像散的 PV 值分别大于 30, $15 \mu\text{m}$ 时仍有很好的拟合能力;同时抗驱动器失效拟合能力好。因此,61 单元环形排布音圈电机变形镜可用于校正大峰谷值低频像差,将其与传统压电陶瓷变形镜组成组合变形镜自适应光学系统,能够提升系统对像差的校正能力。

参 考 文 献

- 1 Yang Huafeng, Liu Guilin, Rao Changhui, *et al.*. Combinational deformable mirror adaptive optics system for compensation of high-order modes of wavefront[J]. *Chin Opt Lett*, 2007, 5(8): 435–437.
- 2 Roberto Biasi, Daniele Gallieni, Piero Salinari, *et al.*. Contactless thin adaptive mirror technology: past, present and future [C]. SPIE, 2010, 7736: 77362B.
- 3 P Salinari, C Del Vecchio, V Biliotti. A study of an adaptive secondary mirror[C]. ICO-16 Satellite Conference, Active and Adaptive Optics, 1993: 247.
- 4 F Wildi, G Brus, A Riccardi, *et al.*. 1st light of the MMT adaptive optics system with deformable secondary mirror[C]. SPIE, 2002, 4839: 155–163.
- 5 Simone Esposito, Armando Riccardi, Luca Fini, *et al.*. First light AO (FLAO) system for LBT: final integration, acceptance test in Europe and preliminary on-sky commissioning results[C]. SPIE, 2010, 7736: 773609.
- 6 Laird M Close, Jared R Males, Derek Kopon, *et al.*. First closed-loop visible AO test results for the advanced adaptive secondary AO system for the Magellan Telescope: MagAO's performance and status[C]. SPIE, 2012, 8447: 84470X.
- 7 Li Xinyang. Optimization of Modal Reconstruction Algorithm and Control Algorithm in Adaptive Optics System[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, 2000: 42–44.
- 李新阳. 自适应光学系统模式复原算法和控制算法的优化研究 [D]. 成都: 中科院光电技术研究所, 2000: 42–44.
- 8 R J Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 1976, 66(3): 207–211.

栏目编辑: 刘丰瑞