

241 单元变形镜结构参数设计及性能仿真

刘李辉^{1*}, 谭碧涛¹, 麦灿基²

¹航天工程大学航天指挥学院, 北京 101416;

²西北核技术研究所激光与物质相互作用实验室, 陕西 西安 710024

摘要 利用多物理场软件 COMSOL, 建立 241 单元变形镜模型, 计算得到变形镜驱动器影响函数数据。利用基于子孔径斜率法的 241 单元自适应光学系统光学像差校正程序, 以 3~60 项泽尼克多项式拟合残差的均方根值为目标, 分析了变形镜结构参数对系统校正能力的影响, 确定了最佳参数值, 计算得到最佳参数下的变形镜耦合量为 11%。在 241 单元自适应光学系统中哈特曼传感器与变形镜之间存在不同平移和旋转误差的条件下, 分析了系统对泽尼克多项式拟合能力的影响。结果表明, 平移量和旋转量分别不能超过 3 mm 和 6°。

关键词 大气光学; 自适应光学; 变形镜; 光学像差; 对准误差

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.090101

Structural Parameter Design and Performance Simulation of 241-Element Deformable Mirror

Liu Lihui^{1*}, Tan Bitao¹, Mai Canji²

¹Space Engineering University, Beijing 101416, China;

²Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract The 241-element deformable mirror model is built using COMSOL Multiphysics, and the influence function data of the driver of the deformable mirror are acquired by calculation. Based on the sub-aperture slope method, a procedure is compiled, by which the optical aberration of the 241-element adaptive optics system is corrected. By taking the root mean square value of the residual fitting error of a 3-60 order Zernike polynomial, the optimal parameter is determined by analyzing the influence of the structural parameters of the deformable mirror on the correction capability. Under this optimal parameter, the coupling factor of the deformable mirror is calculated as 11%. The influence of the system on the fitting ability of the Zernike polynomial is analyzed considering that there exist different translation and rotation errors between the Hartmann sensor and the deformable mirror in the 241-element adaptive optics system. The results show that the translation and rotation errors are not greater than 3 mm and 6°, respectively.

Key words atmospheric optics; adaptive optics; deformable mirror; optical aberration; alignment errors

OCIS codes 010.1008; 230.4040; 220.1010; 220.1140

1 引言

自适应光学系统能够实时测量并补偿由非理想光源、光学元件、非均匀介质、外大气环境引起的波前畸变, 广泛应用于天文观测^[1]、强激光传输^[2]、生物成像^[3]、惯性约束聚变^[4]等领域。作为自适应光学系统的核心部件, 变形镜能够根据输入电压信号控制各镜面驱动器以校正激光波面像

差, 其主要分为分立促动器连续镜面变形镜^[5]、分块拼接式变形镜^[6]、双压电变形镜^[7]、薄膜变形镜^[8]、微机电系统 (MEMS) 变形镜^[9]等。通常, 变形镜驱动器数量越多, 系统校正光学像差的能力越强。为满足输出光束的质量要求, 提高成像清晰度, 技术人员研究和制造了多种不同单元数的变形镜。林旭东等^[10]自制了 137 单元分立促动器的连续镜面式变形镜, 静态展平面形均方根

收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2018-11-19; 录用日期: 2018-11-27

* E-mail: 331977797@qq.com

(RMS)值优于 $\lambda/50$ (波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 峰-谷(PV)值优于 0.18λ 能够对前 7 项泽尼克(Zernike)多项式进行较好地校正, 改善了系统成像能力。为满足天文望远镜的高分辨率成像需求, 林旭东等^[11]研制了 961 单元变形镜, 其展平后面形 RMS 值优于 $\lambda/70$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 相邻驱动器间的耦合量为 23%, 相对先前的 137 单元变形镜, 拟合能力有了较大提高。陈凯等^[12]提出了带边缘驱动的 214 单元单压电变形镜, 驱动器在支撑镜面的同时辅助校正了波前像差, 增加了变形镜控制的灵活性。为校正板条激光器输出光束波前像差, 晏虎等^[13]提出了基于 37 单元双压电片变形镜的自适应光学系统, 将激光光束质量提升了 2~3 倍。围绕固态大功率激光系统中低阶项像差的补偿需求, 刘李辉等^[14]开展了 4 臂边缘驱动变形镜的设计工作, 仿真分析了低阶项像差校正能力, 最后给出了最佳设计参数和校正能力指标。针对天文望远镜的需求, 马剑强等^[15]设计了 200 单元级硅基单压电变形镜, 驱动器在 50 V 电压下变形量可达 $1 \mu\text{m}$, 对前 100 项 Zernike 像差具有良好的校正能力。针对空间相机的像差特点, 陈新东^[16]设计了校正低阶项像差的 9 点促动变形镜, 其在 0.5 h 间隔中的静态特性达到 0.02λ , 驱动器控制面形的重复性精度达到 0.01λ 。为满足校正高阶项像差和低温环境下正常使用的需求, 尤俊成等^[17]研制了 913 单元的分立式连续表面变形镜, 其驱动点最大变形量为 $3.5 \mu\text{m}$, 相邻驱动器间交连值为 9.3%, 对 Zernike 多项式的

拟合能力达到设计要求, 变形镜能够在低温环境下工作, 不影响系统正常使用。

根据工程研制设计指标, 本文利用多物理场仿真软件 COMSOL 建立了 241 单元分立驱动器连续镜面变形镜模型, 以拟合 3~60 项(前两项为倾斜量, 这里不予考虑)Zernike 多项式的能力大小为依据, 分析确定了变形镜极头半径和驱动器间距的最佳参数, 并在最佳参数下开展了驱动器耦合量的计算工作, 分析了 241 单元自适应光学系统中哈特曼传感器与变形镜对准误差对系统拟合 Zernike 多项式能力的影响。

2 241 单元变形镜模型

利用多物理场仿真软件构建 241 单元变形镜模型。如图 1 所示, 变形镜主要由镜面、极头和驱动器组成, 其中镜面和极头材料是单晶硅, 驱动器材料是压电陶瓷。常温下, 硅的杨氏模量和泊松比分别为 $131 \times 10^9 \text{ Pa}$ 和 0.27, 压电陶瓷的杨氏模量和泊松比分别为 $7.65 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 和 0.32。驱动器在电压驱动下通过极头实现对镜面的拉伸控制, 241 个驱动器呈方形排布, 相邻驱动器中心距离为驱动器间距, 任意相邻两个驱动器间距相等, 整个镜面直径为 210 mm, 镜面厚度为 2 mm, 整个有限元分析的网格形式采用自由剖分四面体。

在其中一个驱动器上加载预定义位移 $1 \mu\text{m}$, 其余驱动器和镜面四周边缘为固定约束, 得到对应的镜面影响函数面形和曲线, 如图 2 所示。

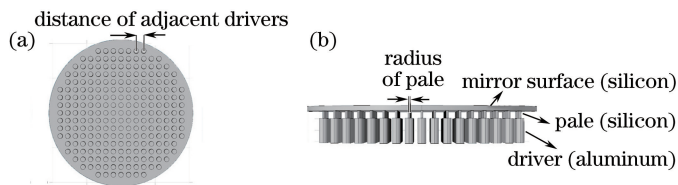


图 1 241 单元变形镜模型结构。(a)背面;(b)侧面

Fig. 1 Structural diagram of model of 241-element deformable mirror. (a) Back; (b) side

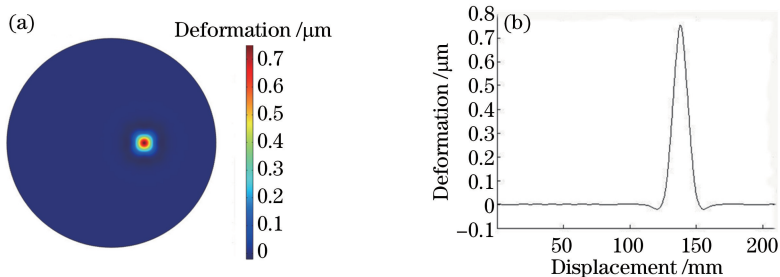


图 2 驱动器影响函数。(a)影响函数面形;(b)影响函数曲线

Fig. 2 Influence function of driver. (a) Surface of influence function; (b) curve of influence function

在 241 单元自适应光学系统中, 整个传感器靶面为 $288 \text{ pixel} \times 288 \text{ pixel}$ 。根据应用的激光光斑形态, 将靶面分成 16×16 子孔径矩阵, 实际工作的只有 192 个子孔径, 每个子孔径为 $18 \text{ pixel} \times 18 \text{ pixel}$ 。

如图 3 所示, 241 个驱动器分别位于子孔径 4 个顶点处, 驱动器与子孔径分布布局的对准关系有对正、平移和旋转三种, 平移和旋转影响系统校正正像差的能力和稳定性。

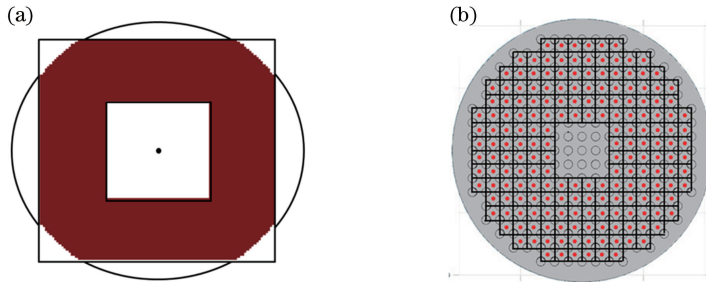


图 3 激光光斑、传感器子孔径和驱动器关系图。(a)激光光斑;(b)子光斑、子孔径和驱动器对准示意图

Fig. 3 Relationship among laser facula, sub-aperture and driver of sensor. (a) Laser facula; (b) alignment of sub-facula, sub-aperture, and drivers

3 研究方法

编写 Matlab 程序仿真 241 单元自适应光学系统校正光学像差的过程。设定输入像差分别为 3~60 项 Zernike 多项式, 得到 241 单元自适应光学系统拟合 Zernike 多项式的拟合残差, 以表征系统的校正能力。其编写思路为, 根据 Zernike 多项式数学表达式生成含有某项 Zernike 多项式的圆形激光光斑数据, 即待校正的光学像差波面, 结合像素和光斑尺寸的对对应关系, 将待校正的光学像差波面整形为应用激光的光斑形状[图 3(a)], 将得到的光斑投射到 192 子孔径哈特曼传感器[图 3(b)], 即分别提取每个子孔径对应的光斑数据, 并计算其远场光斑, 由此可计算得到各子光斑在子孔径的横向和纵向位置, 再与无光学像差光斑对应的标准远场光斑在各子孔径所处位置作比较, 即得到每个子孔径的斜率,

所有子孔径斜率数据可按照一定顺序形成待校正光学像差波面的斜率矩阵。然后, 如第 2 节所述, 通过多物理场仿真软件 COMSOL 仿真得到 241 个驱动器的影响函数面形数据(图 2), 每一个影响函数面形经过上述过程得到对应的斜率矩阵, 再将 241 个斜率矩阵拼接起来, 即为 241 单元自适应光学系统的影响函数矩阵。根据待校正光学像差波面的斜率矩阵和光学系统的影响函数矩阵, 利用最小二乘法可求得为拟合待校正光学像差波面而应加载在 241 个驱动器上的预定义位移, 将计算得到的预定义位移加载到变形镜对应的驱动器上生成校正波面, 待校正光学像差波面与校正波面之差即为拟合残差波面。根据拟合残差波面数据可计算得到拟合残差的均方根(RMS)值, 根据拟合残差 RMS 值定量反映系统的校正能力, 仿真过程如图 4 所示。

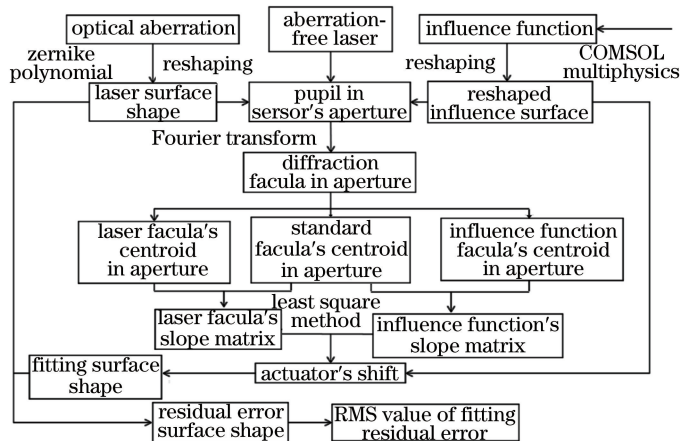


图 4 仿真计算过程

Fig. 4 Process of simulation and calculation

作为 241 单元自适应光学系统的核心部件,变形镜尺寸参数直接影响系统的校正能力。因此,有必要研究设计参数对系统校正能力的影响,并确定变形镜设计参数的最佳值。不同的设计参数值决定变形镜驱动器具有不同的影响函数。从上述仿真过程可知,不同的影响函数最后直接影响系统拟合 Zernike 多项式的能力。因此,可根据 Zernike 多项式拟合残差数据来确定变形镜设计参数的最佳值。

4 变形镜参数选择

通过变形镜基本理论分析,影响 241 单元变形镜拟合 Zernike 多项式能力(即校正波前像差能力)

的结构参数有极头半径 r 和驱动器间距 d 。本节采用子孔径斜率法,计算分析不同结构参数下变形镜拟合 3~60 项 Zernike 多项式的能力变化,并据此确定极头半径和驱动器间距的最佳参数。

4.1 极头半径的选择

在 241 单元变形镜设计结构中,由于尺寸限制和加工约束,极头半径可在 1~3.5 mm 范围选择。从小到大取相等间隔的 5 组极头半径参数值(驱动器间距参数分别设为 9, 10, 11 mm),利用仿真程序分别产生 PV 值为 $1\ \mu\text{m}$ 的 3~60 项 Zernike 多项式的像差,并计算 3~60 项 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值,具体结果如图 5~7 所示。

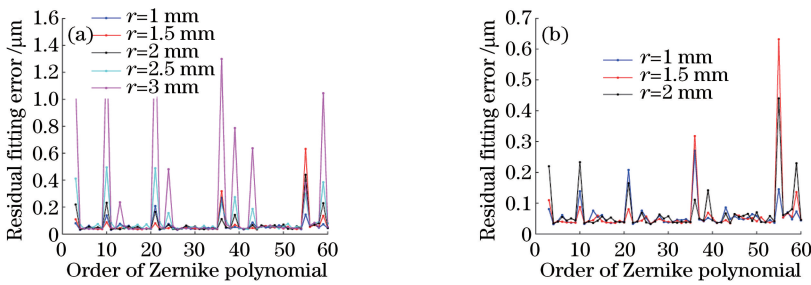


图 5 9 mm 驱动器间距下 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。(a) r 范围为 1~3 mm;(b) r 范围为 1~2 mm

Fig. 5 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial when distance of adjacent drivers is 9 mm.

(a) Range of r is 1-3 mm; (b) range of r is 1-2 mm

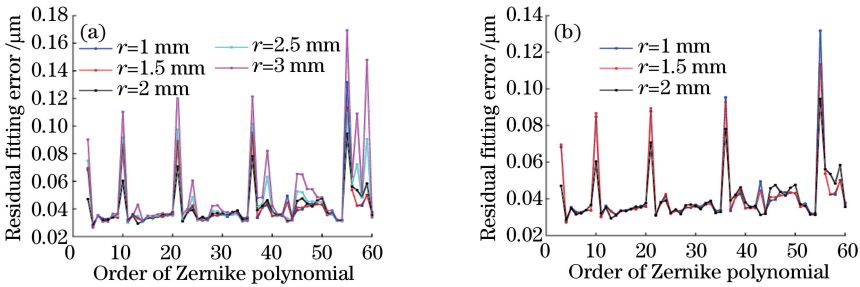


图 6 10 mm 驱动器间距下 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。(a) r 范围为 1~3 mm;(b) r 范围为 1~2 mm

Fig. 6 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial when distance of adjacent drivers is 10 mm.

(a) Range of r is 1-3 mm; (b) range of r is 1-2 mm

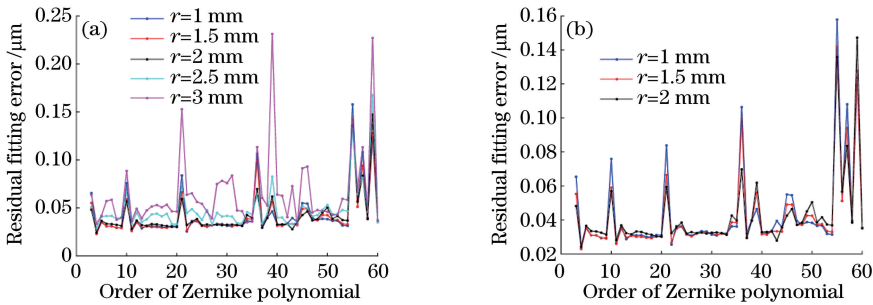


图 7 11 mm 驱动器间距下 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。(a) r 范围为 1~3 mm;(b) r 范围为 1~2 mm

Fig. 7 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial when distance of adjacent drivers is 11 mm.

(a) Range of r is 1-3 mm; (b) range of r is 1-2 mm

由图 5~7 可知, 241 单元变形镜对各项 Zernike 多项式的拟合能力不同。随着极头半径增大, 变形镜拟合对应项数 Zernike 多项式的能力逐渐降低; 在驱动器间距分别为 9, 10, 11 mm 的情况下, 极头半径 1 mm 和 1.5 mm 对应的 Zernike 拟合残差 RMS 值在绝大多数 Zernike 多项式项数上要小于其他极头半径所对应的 RMS 值, 即极头半径为 1 mm 和 1.5 mm 时, 变形镜整体校正效率更高。通过以上分析可知, 在 1~3.5 mm 范围内, 可选择

1 mm 和 1.5 mm 作为该参数最佳值的备选。

4.2 驱动器间距的选择

在 241 单元变形镜设计结构中, 由于镜面和驱动器大小限制, 驱动器间距可在 8~12 mm 范围选择。从小到大取相等间隔的 5 组驱动器间距参数值 (极头半径参数分别设为 1 mm 和 1.5 mm), 利用仿真程序分别产生 PV 值为 $1 \mu\text{m}$ 的 3~60 项 Zernike 多项式的像差, 并计算 3~60 项 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值, 具体结果如图 8、图 9 所示。

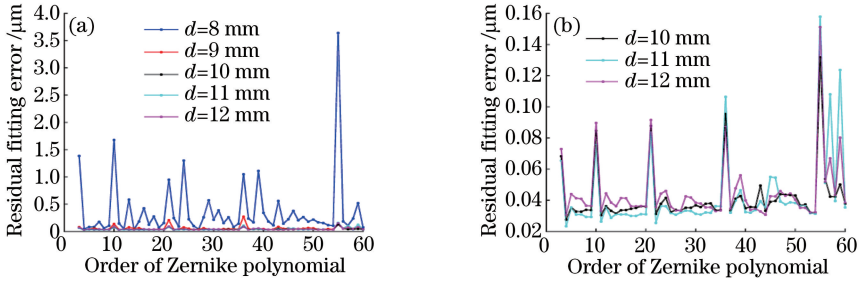


图 8 1 mm 极头半径下 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。(a) d 范围为 8~12 mm; (b) d 范围为 10~12 mm

Fig. 8 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial when radius of pale is 1 mm.

(a) Range of d is 8-12 mm; (b) range of d is 10-12 mm

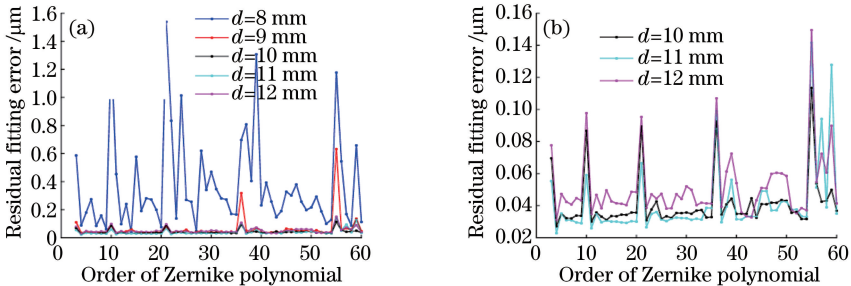


图 9 1.5 mm 极头半径下 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。(a) d 范围为 8~12 mm; (b) d 范围为 10~12 mm

Fig. 9 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial when radius of pale is 1.5 mm.

(a) Range of d is 8-12 mm; (b) range of d is 10-12 mm

由图 8、图 9 可知, 在极头半径分别为 1 mm 和 1.5 mm 的情况下, 驱动器间距 8 mm 和 9 mm 所对应的 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值整体大于驱动器间距 10~12 mm 的情况, 即所对应的校正能力较差。虽然驱动器间距在 10~12 mm 范围内, Zernike 多项式拟合残差 RMS 值变化曲线趋势一致且大小较为接近, 但驱动器间距为 10 mm 对应的拟合残差 RMS 值整体更好。通过以上分析可知, 驱动器间距参数取值约为 10 mm 时, 系统校正效率更高。

4.3 变形镜最佳参数的选择

由 4.1 节和 4.2 节可知, 极头半径可在 1 mm 和 1.5 mm 选择, 驱动器间距可在 10 mm 左右选择。为更准确地选出变形镜最佳参数, 分别取极头半径

为 1 mm 和 1.5 mm, 驱动器间距为 9.5, 10, 10.5 mm, 计算每组参数下 3~60 项 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值, 具体结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 驱动器间距为 9.5 mm 对应的 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值变化曲线整体数值大于其他变化曲线的数值, 即对应的变形镜校正效率偏低, 最佳参数不予考虑。在 $r=1 \text{ mm}$ 、 $d=10.5 \text{ mm}$ 和 $r=1.5 \text{ mm}$ 、 $d=10.5 \text{ mm}$ 两组参数下, Zernike 多项式拟合残差 RMS 值变化曲线基本一致, 且数值相近, 均可作为最佳参数组合。考虑驱动器在顶拉过程中承受一定的应力, 为增大应力承受能力, 考虑以 $r=1.5 \text{ mm}$ 作为极头半径最佳参数。综合以上分析, 极头半径最佳参数选择 1.5 mm, 驱动器间距最佳参数选择 10.5 mm。

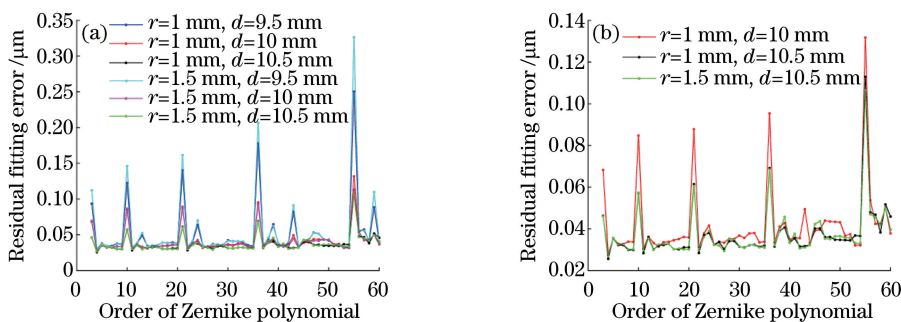


图 10 当极头半径为 1~1.5 mm, 驱动器间距为 9.5~10.5 mm 时 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。

(a) 未去掉间距为 9.5 mm 的曲线; (b) 去掉了间距为 9.5 mm 的曲线

Fig. 10 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial when radius of pale is 1-1.5 mm and distance of adjacent drivers is 9.5-10.5 mm. (a) Curves when distance of 9.5 mm is not deleted; (b) curves when distance of 9.5 mm is deleted

5 变形镜性能仿真

5.1 变形镜耦合计算

驱动器间的耦合情况会影响变形镜校正光学像差的能力:若耦合系数太小,变形镜对低频像差的校正能力就弱;若耦合系数太大,变形镜对高频像差的校正能力就会减弱。为掌握最佳设计参数下变形镜驱动器的耦合情况,根据以上结构参数建立 241 单元变形镜模式,在其中一个驱动器上加载预定义位移,用相邻驱动器位置的镜面变形量除以该驱动器位置的镜面变形量,即为耦合量。耦合量计算曲线如图 11 所示。

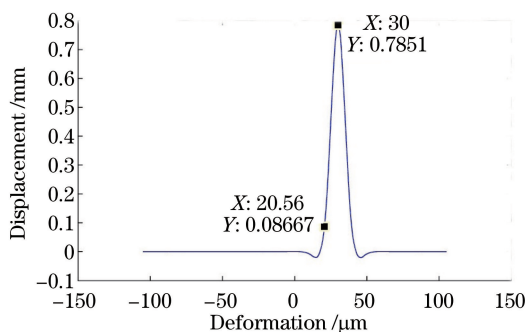


图 11 变形镜耦合量计算曲线

Fig. 11 Calculated curve of coupling factor of deformable mirror

图 11 表示在距离变形镜中心 30 mm 处驱动器的影响函数。由于相邻驱动器间距为 10 mm,因此在某水平方向上该驱动器的相邻驱动器应位于距离中心 20 mm 和 40 mm 处。距离中心 20 mm 处的驱动器在该驱动器作用下产生了 $0.08667 \mu\text{m}$ 的位移量,而其自身位移量为 $0.7851 \mu\text{m}$,即耦合量约为 11%,该数值处于正常变形镜耦合量范围,满足设计要求。

5.2 241 单元自适应光学系统对准误差对校正能力的影响

在自适应光学系统搭建过程中,哈特曼传感器子孔径分布与变形镜驱动器布局存在严格的匹配对准关系,直接影响系统对光学像差的校正能力。哈特曼传感器与变形镜是相互独立的且在光路上具有一定距离,在实际安装调试工作中,二者不可能达到理论上的严格匹配,而是存在一定的相对平移和旋转。因此,有必要研究哈特曼传感器与变形镜对准误差对自适应光学系统校正光学像差能力的影响。

以 3~60 项拟合残差 RMS 值为目标,分析当存在不同平移和旋转的情况下,系统对 3~60 项 Zernike 多项式像差的校正能力。在实际安装中,技术人员会通过耦合镜将激光准直耦合进入哈特曼传感器,所以对对准误差实际上是变形镜相对于激光和哈特曼传感器对准关系中的平移和旋转,因此导致各驱动器产生的影响函数面形的平移和旋转,而这种平移和旋转量的控制可根据实际尺寸和像素关系的程序实现。

根据应用激光的光斑形状大小和变形镜尺寸,分别选取几组平移量和旋转量参数进行仿真计算。3~60 项 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值在不同平移量下的变化曲线如图 12 所示。

由图 12 可知,当平移量小于 3 mm,各阶项 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值变化不大;当平移量大于 3 mm,拟合残差 RMS 值有所增大,即系统的校正能力下降。由此可知,在进行 241 单元自适应光学系统调试安装时,哈特曼传感器与变形镜的对准误差平移量不得超过 3 mm。

在实际安装调试中,哈特曼传感器和变形镜在水平和竖直方向往往存在平移误差,此时 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值的变化曲线如图 13 所示。

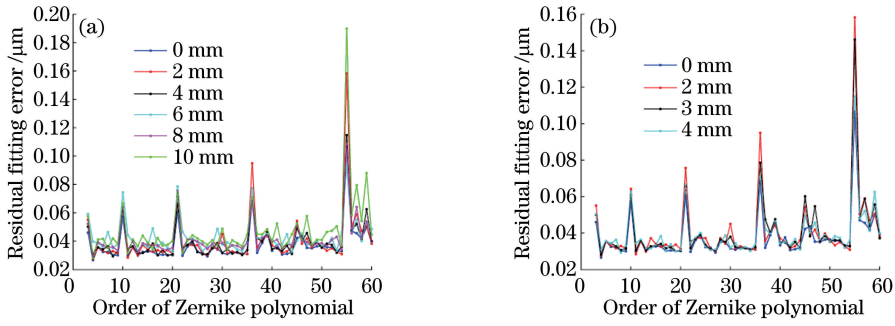


图 12 不同平移量下 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。(a)平移量为 0~10 mm;(b)平移量为 0~4 mm

Fig. 12 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial under different translation errors.

(a) Translation error is 0-10 mm; (b) translation error is 0-4 mm

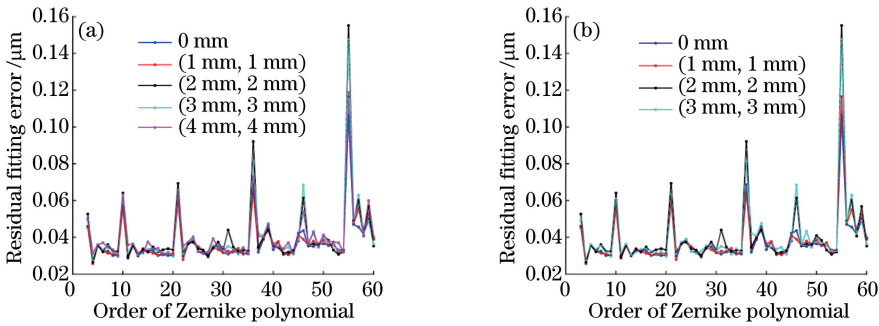


图 13 同时存在水平和竖直平移量时 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。(a)平移量为 0~10 mm;(b)平移量为 0~4 mm

Fig. 13 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial when horizontal and vertical translation errors coexist.

(a) Translation error is 0-10 mm; (b) translation error is 0-4 mm

从图 13 可以看出,随着两个方向平移量的增大,Zernike 多项式拟合残差 RMS 值逐渐增大,即校正能力下降,但变化曲线与只有一个方向存在平

移量的变化曲线的趋势基本一致。

Zernike 多项式拟合残差 RMS 值在不同旋转量下的变化曲线如图 14 所示。

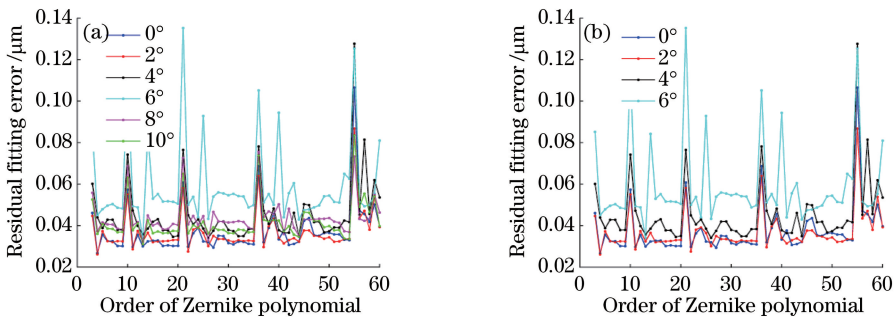


图 14 不同旋转量下 Zernike 多项式的拟合残差 RMS 值。(a)旋转量为 0°~10°;(b)平移量为 0°~6°

Fig. 14 RMS value of residual fitting error of Zernike polynomial under different rotation errors.

(a) Rotation error is 0°-10°; (b) rotation error is 0°-6°

由图 14 可知,当旋转量小于 6°时,3~60 阶 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值曲线随角度变化整体起伏不大;当旋转量为 6°时,RMS 值变化曲线有一个突变提升,即系统校正能力出现下降。因此,为保持系统像差的校正能力,该系统的哈特曼传感器与变形镜旋转误差不能超过 6°。

6 结 论

基于实现大口径高功率激光在大气传输过程中波前像差校正的需要,建立了 241 单元变形镜模型,以 Zernike 多项式拟合残差 RMS 值为目标,分析了极头半径和驱动器间距结构参数对系统拟合 3~60

项 Zerniek 多项式能力的影响,结合工程实际和分析结论,确定分别以 1.5 mm 和 10.5 mm 作为极头半径和驱动器间距的最佳参数。在最佳参数结构下,计算得到变形镜耦合量为 11%,具有较好的像差校正能力。为确保 241 单元自适应光学系统满足校正能力的需求,在安装调试过程中,平移量和旋转量分别不能超过 3 mm 和 6°。

参 考 文 献

- [1] Wei P F, Lu Z W, Liu X Y, *et al.* Performance analysis of adaptive optical system for spatial objectives[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 0701001.
卫沛锋, 卢振武, 刘欣悦, 等. 自适应光学系统对空间运动目标校正性能分析[J]. *光子学报*, 2015, 44(7): 0701001.
- [2] Lü B D. Developments in the propagation, transformation and beam control of high-power lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(1): 40-45.
吕百达. 强激光传输变换和光束控制研究的进展[J]. *红外与激光工程*, 2000, 29(1): 40-45.
- [3] Zhang C H, Zhao Z W, Chen L Y, *et al.* Application of adaptive optics in biological fluorescent microscopy [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2017, 47(8): 084204.
张财华, 赵志伟, 陈良怡, 等. 自适应光学在生物荧光显微成像技术中的应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(8): 084204.
- [4] Jiang W H, Yang Z P, Guan C L, *et al.* New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1625-1634.
姜文汉, 杨泽平, 官春林, 等. 自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1625-1634.
- [5] Lin X D, Liu X Y, Wang J L, *et al.* Progress of the continuous surface deformable mirror based on piezoceramic actuator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 090003.
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 090003.
- [6] Li B, Tang J L, Yu W H, *et al.* Effect of segmented errors on image quality of segmented telescope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071202.
李斌, 唐金龙, 于文豪, 等. 拼接误差对拼接镜成像质量的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071202.
- [7] Dong L Z, Lei X, Liu W J, *et al.* Optimization of beam intensity distributions with intracavity bimorph deformable mirror [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(7): 1691-1694.
董理治, 雷翔, 刘文劲, 等. 腔内双压电变形镜光强分布优化[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(7): 1691-1694.
- [8] Li B M, Liao W H, Shen J X, *et al.* Wavefront control algorithm research on micromachined membrane deformable mirror in the human eye aberration correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 917-921.
李邦明, 廖文和, 沈建新, 等. 微机械薄膜变形镜在人眼像差校正中的波前控制算法研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 917-921.
- [9] Tan Z J, Chen H Q, Kang J R, *et al.* Design of MEMS deformable micro-mirror for compensating thermally induced aberration of laser diode-pumped solid-state laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 853-858.
谭佐军, 陈海清, 康竟然, 等. 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的 MEMS 微变形镜设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 853-858.
- [10] Lin X D, Liu X Y, Wang J L, *et al.* Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 267-273.
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 137 单元变形镜的性能测试及校正能力实验[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 267-273.
- [11] Lin X D, Liu X Y, Wang J L, *et al.* Development and performance test of the 961-element deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601001.
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 961 单元变形镜研制及性能测试[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0601001.
- [12] 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.
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.
- [13] Yan H, Lei X, Liu W J, *et al.* Beam cleanup of slab laser with 37-element bimorph deformable mirror [J].

- High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1663-1666.
- 晏虎, 雷翔, 刘文劲, 等. 37 单元双压电片变形镜板条激光光束净化 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1663-1666.
- [14] 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.
- [15] 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.
- 马剑强, 刘莹, 陈俊杰, 等. 200 单元硅基单压电变形镜的设计与测试 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2047-2053.
- [16] 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.
- [17] You J C, Zhou H, Guan C L, *et al.* Performance test and analysis of 913-element deformable mirrors [J]. Laser Technology, 2017, 41(6): 867-871.
- 尤俊成, 周虹, 官春林, 等. 913 单元变形镜性能测试与分析 [J]. 激光技术, 2017, 41(6): 867-871.