

4臂边缘驱动变形镜校正低阶像差的仿真计算

刘李辉¹ 龙吟² 曹芬^{1,3} 刘文智¹ 房勇¹ 刘文广³

¹西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

²中国人民解放军乌鲁木齐总医院, 新疆 乌鲁木齐 830000

³国防科技大学, 湖南 长沙 410073

摘要 围绕未来固态大功率激光系统中低阶像差补偿的需求,开展了边缘驱动变形反射镜的优化设计和仿真分析。提出了4臂边缘驱动变形镜设计结构,并建立了仿真模型,以变形镜拟合残差面形的均方根(RMS)值和峰-谷(PV)值为目标,分析了不同结构参数对变形镜校正低阶像差能力的影响。根据对离焦、像散和彗差校正拟合残差面形的RMS值和PV值随结构参数变化的曲线,确定了变形镜的最佳设计参数并给出了该参数下拟合离焦、像散和彗差的残差面形RMS值和PV值。对于PV值分别为20、10、10 μm 的离焦、像散和彗差,拟合残差面形RMS值和PV值分别为0.2366 μm 和1.3762 μm 、0.0112 μm 和0.1146 μm 以及0.1606 μm 和0.9773 μm 。以上结果表明,设计的4臂边缘驱动变形镜的校正效果符合设计要求。

关键词 自适应光学; 边缘驱动变形镜; 低阶像差; 仿真模拟

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1012001

Simulation and Calculation of Low Order Aberration Corrected by Four-Arm Edge-Driven Deformable Mirror

Liu Lihui¹ Long Yin² Cao Fen^{1,3} Liu Wenzhi¹ Fang Yong¹ Liu Wenguang³

¹Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

²Urumuqi General Hospital of Chinese People's Liberation Army, Urumqi, Xinjiang 830000, China

³National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Based on the need of compensating middle and low order aberrations which lie in solid high power laser system in the future, optimal design and simulation analysis about edge-driven mirror are done. The design frame of four-arm edge-driven mirror is put forward, and the simulation model is built. Aimed at the residual error root mean square (RMS) and peak to valley (PV) value, the influence of structural parameters on the performance of correcting low order aberration is analyzed. According to the residual error RMS and PV value curve of correcting focus astigmatism, coma with structural parameters changing, the optimal parameters of the model are chosen and corresponding residual error RMS and PV values are shown. The simulation and calculation results show that for focus at 20 μm , astigmatism at 10 μm and coma at 10 μm of PV, the residual error correcting focus, astigmatism and coma are 0.2366 μm of RMS and 1.3762 μm of PV, 0.0112 μm of RMS and 0.1146 μm of PV and 0.1606 μm of RMS and 0.9773 μm of PV, respectively. These data prove that correction performance of four-arm edge-driven deformable mirror satisfies the demand of design.

Key words adaptive optics; edge-driven deformable mirror; low-order aberration; simulation

OCIS codes 220.1010; 010.1080; 230.4040

1 引言

固体激光器^[1]因其自身具有的体积小、重量轻、效率高、性能稳定、可靠性好和寿命长等优点已成为高功率激光器^[2]发展的重要方向。然而,随着应用系统对激光器输出功率需求的提高,如何在不断提高激光器输出功率的同时,仍然保持高输出光束质量,成为发展高功率固态激光器面临的重要技术难题。为此,研究人

收稿日期: 2015-04-10; 收到修改稿日期: 2015-05-17

作者简介: 刘李辉(1987—),男,硕士,工程师,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: liulihuiyang@qq.com

员采用多种技术方法来解决激光器中由热效引起的光束质量下降问题,如采用新的增益介质材料降低介质热变形^[9],采用窄线宽抽运源减小增益介质中的废热,或采用具有更高散热能力的结构设计,如采用板条激光^[4-6]、薄片激光^[7-12]和光纤激光^[13]等更有利于降低激光增益介质热变形的激光器设计。通过上述技术方法可以使激光器在一定功率水平下输出光束质量很好,但随着激光器输出功率的进一步提高,由热效应引起的离焦、像散和彗差等低阶像差问题日益严重^[14]。

为实现对高功率激光系统中大量低阶像差的补偿,国内外学者分别开展多种设计概念的大行程低阶变形镜研制,主要包括双压电变形镜^[15-19]、薄膜变形镜^[20]、微机电变形镜^[21-24]等。由于传统变形镜驱动器数目与变形镜口径尺寸有关,因此大口径变形镜要求数目庞大的驱动器,导致自适应光学系统复杂,成本增加。为克服这一难点,国外科研人员提出了边缘驱动变形镜的设计概念,其驱动器数目仅与需要校正的像差阶数有关。2005年,Lemaitre^[25]提出了边缘驱动变形镜模型,研制了瓶形结构的边缘驱动变形镜,测量结果显示该变形镜可以校正3阶和5阶泽尼克像差。2008年,Hugot等^[26]提出了单驱动器边缘补偿像散的瓶形或类圆形结构,理论分析了瓶形厚度分布对校正质量的影响,也证明了边缘厚度抑制了高阶光学模式的产生。2009年,Hugot等^[27]又研究出一套以球面应力抛光复曲面变形镜为校正器的自适应光学系统,该系统能够将中高像差的均方根(RMS)值抑制在5 nm以下。实验表明,该系统对波前峰-谷(PV)值为19478 nm,RMS值为3977.8 nm的像差校正效果较好,校正残差的PV值为390 nm,RMS值为96.6 nm。2012年,Laslandes等^[28]紧接着设计出了该12臂瓶形边缘驱动变形镜,变形镜质量为4 kg,高为80 mm,直径为130 mm,内圆直径为90 mm,内圆厚度为3.5 mm,驱动器最大加载电压为80 V,可以驱动10 μm的位移,对于1000 nm的随机波前误差,实验测试其校正残差PV值为9 nm,RMS值为1.8 nm。2013年,Lemaitre^[29]报道了基于变形镜太空应用项目(MADRAS Project)研制的24驱动器边缘驱动变形镜,该变形镜直径为130 mm,高为80 mm,质量为4 kg,可以对直径为3 m的天文望远镜进行相位误差校正,表面精度(均方根值)控制在6~8 nm。

本文面向大功率固态激光系统中低阶像差补偿的需求,借鉴国际上边缘驱动变形镜的概念设计,重点开展少单元数的大行程边缘驱动变形镜技术研究,寻求边缘驱动变形镜的优化设计方法,开展边缘驱动变形镜的结构设计,为我国大功率固态激光系统光束质量控制提供新的技术方案。本文建立了4臂边缘驱动变形镜模型,仿真了镜面厚度等参数对变形镜校正低阶像差能力的影响,优化了变形镜的结构参数,通过有限元仿真计算得到了变形镜对像差校正的拟合残差面形数据和应力分布情况。

2 边缘驱动变形镜的结构设计

本文主要研究边缘驱动变形镜对离焦、像散和彗差的校正分析,它们的泽尼克多项式可以分别表示为 $(2r^2-1)$ 、 $r^2 \cos 2\theta$ 和 $(3r^3-2r)\cos \theta$,在 $[-1,1]$ 的径向区间,在 $r=0, -\sqrt{2}/3, \sqrt{2}/3$ 处存在径向驻点;在 $[0,2\pi]$ 切向范围内,在 $\theta=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 处存在切向驻点。根据驱动器数目及位置选择方式,在驻点位置需要有驱动器才能完成对像差的校正,对于3个径向驻点, $r=0$ 处可以设定一个固定约束,而对于边缘驱动变形镜,另外两个径向驻点是无法设计驱动器的,不过可以通过边缘驱动器的作用带动镜面变形来校正一定比例面积内的彗差。对于4个切向驻点,为了保证校正的高效性,可以考虑设计4对相互间隔 $\pi/2$ 的驱动器组,每组两个驱动器。因为边缘驱动变形镜是由边缘驱动器的作用带动镜面变形来完成像差校正的,所以边缘驱动器的位置和半径大小对校正效果影响不大,根据结构需要按常规尺寸设计即可。

图1给出了4臂边缘驱动变形镜的结构。变形镜由镜架和镜面组成,镜架由直径为130 mm的圆盘和4支作用臂构成,圆盘中心凹陷形成一个内圆,圆盘边缘相隔1/4个圆周处有内驱动器。在每个内驱动器位置处延伸外作用臂,作用臂长为40 mm,宽为10 mm,厚度与外圆厚度相等,每个作用臂边缘有一个外驱动器,这样就形成了4对边缘驱动器,内、外驱动器半径均为4 mm,通过在驱动器上加载驱动力使作用臂发生弯曲,最终带动镜面边缘产生形变,控制加载在各个驱动器上力的方向和大小组合形成低阶像差的本征模式,从而实现对低阶像差的校正。此变形镜模型的参数主要有内圆直径 D 、内圆厚度 d_1 、外圆厚度 d_2 和镜面厚度 d_3 。变形镜镜面采用单晶硅材料,镜架采用不锈钢材料,它们的杨氏模量和泊松比在293.15 K温度下分别为 131×10^9 Pa、0.27、 69×10^9 Pa、0.33。

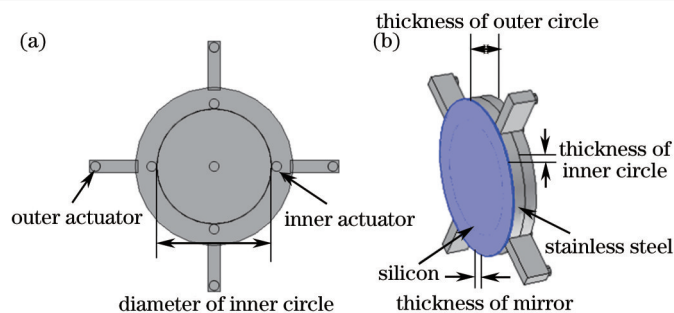


图1 4臂边缘变形镜模型结构。(a)正面;(b)侧面

Fig.1 Mode of four-arm edge-driven deformable mirror. (a) Facade; (b)side

在内驱动器或者外驱动器上加载预定义位移 $1\ \mu\text{m}$,其余驱动器为固定约束,则可以得到对应的镜面影响函数,如图2所示。对比内、外驱动器产生的镜面形变,在加载相同的预定义位移下,内驱动器对等距离处产生的形变量较大,波及范围更广,因此内驱动器对像差本征模式的产生起主要作用。经过计算内驱动器影响函数面形的PV值和RMS值分别为 $0.97\ \mu\text{m}$ 和 $0.28\ \mu\text{m}$,外驱动器影响函数面形的PV值和RMS值分别为 $0.16\ \mu\text{m}$ 和 $0.018\ \mu\text{m}$ 。在内、外驱动器上分别施加 $2、4、8\ \mu\text{m}$ 的预定义位移,并计算出影响函数面形的PV值和RMS值,作出曲线如图3、4所示。

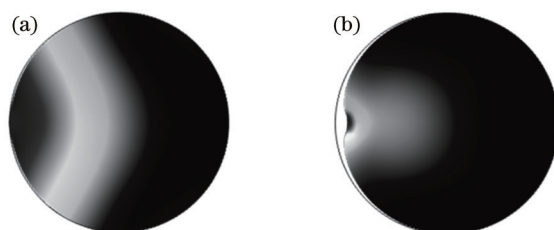


图2 驱动器影响函数。(a)内驱动器;(b)外驱动器

Fig.2 Actuator's influence function. (a) Inner actuator; (b) outer actuator

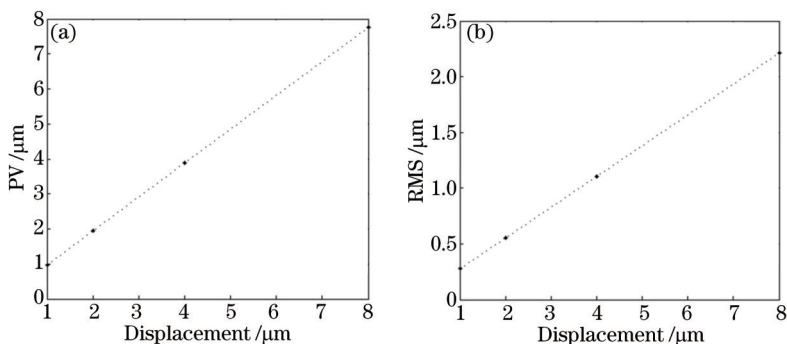


图3 内驱动器影响函数随位移的变化曲线。(a) PV值;(b) RMS值

Fig.3 Curve of inner actuator's influence function with displacement. (a) PV; (b) RMS

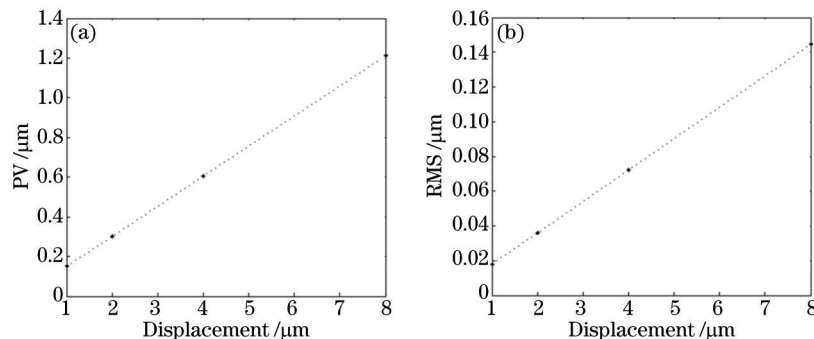


图4 外驱动器影响函数随位移的变化曲线。(a) PV值;(b) RMS值

Fig.4 Curve of outer actuator's influence function with displacement. (a) PV; (b) RMS

从图3、4可知,内、外驱动器影响函数PV值和RMS值均随着预定义位移增加而逐步变大,并呈现一次函数特性,所以内、外驱动器具有较好的线性特征。

3 研究方法

根据变形镜驱动器影响函数能够拟合出与理想像差波面近似的校正面形,进而求得拟合残差面形。变形镜拟合残差面形是变形镜校正波前像差剩余的相位残差,它是通过初始像差波面与校正像差面形相减得到,图5展示了从选择参数建立变形镜模型到求得变形镜拟合残差面形数据的过程。

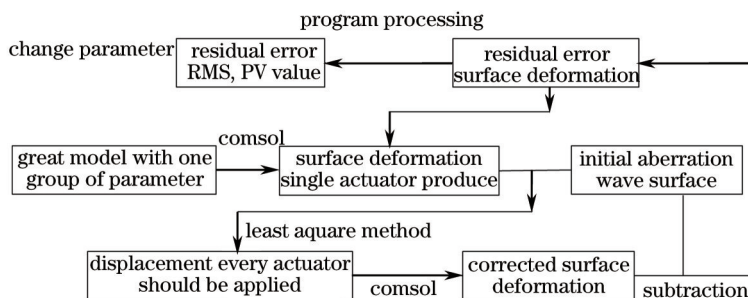


图5 仿真计算过程

Fig.5 Process of simulation and calculation

选一组变形镜结构参数,在有限元仿真软件 comsol 中建立镜架模型并得到各驱动器影响函数。根据影响函数,通过最小二乘法可以求得校正像差应加载的驱动器位移,在驱动器上加载得到的预定义位移仿真得到变形镜校正面形,再与理想像差波面相减得到拟合残差面形,最后通过程序计算得到拟合残差面形的RMS值和PV值,它们是评价变形镜像差校正效果的重要参数。在变形镜结构模型中,改变其中一个结构参数(其余参数固定不变)来校正预设定PV值的理想像差波面,以80%拟合残差面形数据(技术要求之一)的RMS值和PV值为目标来确定对应参数的最佳值。

4 变形镜设计参数选择

根据80%拟合残差面形数据的RMS值和PV值来确定各个设计参数的最佳数值时,原则是尽量选择RMS值和PV值极小值对应的数值,在校正离焦、像散和彗差拟合残差RMS值和PV值对应不同极小值情况下,主要从拟合残差PV值在初始PV值10%以内(校正效率大于90%)的技术需求考虑。由于驱动器具有线性特征的,所以在选择设计参数时可以采用优化一个参数,固定其他参数的方式,逐个找出设计参数的最佳值。

4.1 内圆直径的参数选择

设计内圆厚度 $d_1=10$ mm,外圆厚度 $d_2=20$ mm,镜面厚度 $d_3=2$ mm,建立边缘驱动变形镜模型,针对PV值为 $20 \mu\text{m}$ 的离焦、 $10 \mu\text{m}$ 的像散和彗差,通过最小二乘法、有限元仿真获得校正像差面形、拟合残差面形数据,分析计算得到拟合残差面形的RMS值和PV值,拟合残差面形RMS值和PV随内圆直径变化曲线如图6~8所示。

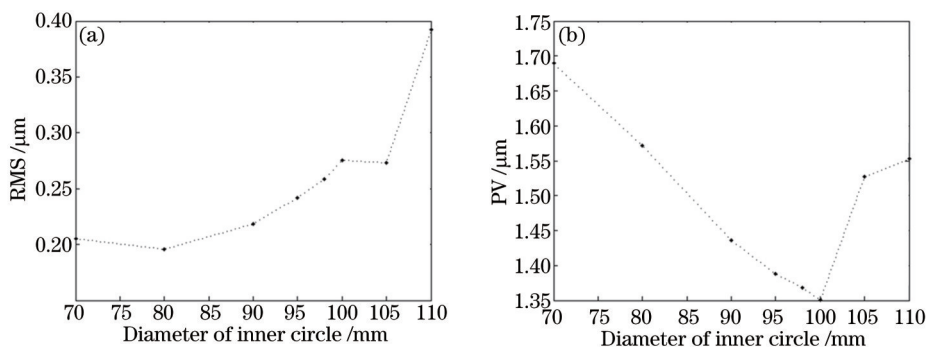


图6 拟合离焦残差面形随内圆直径变化曲线。(a) RMS值;(b) PV值

Fig.6 Curve of residual focus error with diameter of inner circle. (a) RMS; (b) PV

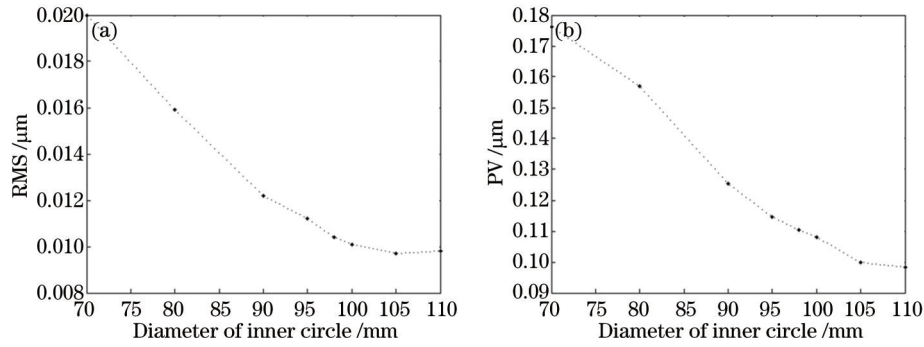


图7 拟合像散残差面形随内圆直径变化曲线。(a) RMS值;(b) PV值

Fig.7 Curve of residual astigmatism error with diameter of inner circle.(a) RMS; (b) PV

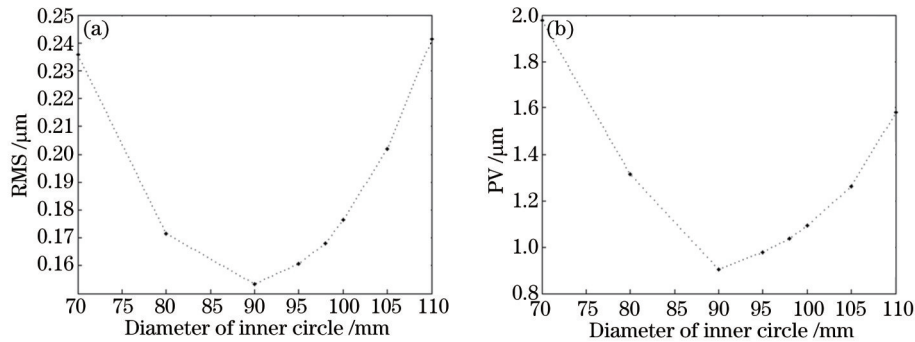


图8 拟合彗差残差面形随内圆直径变化曲线。(a) RMS值;(b) PV值

Fig.8 Curve of residual coma error with diameter of inner circle. (a) RMS; (b) PV

随着内圆直径增大,离焦残差RMS值逐渐增大,PV值先减小后增大并在100 mm处存在极小值;像散残差RMS值和PV逐渐减小,在内圆直径大于100 mm之后减小趋势趋于平缓,与离焦和像散比较,像散残差RMS值和PV值整个变化范围不大;彗差残差RMS值和PV值先减小后增大,在90 mm处存在极小值,内圆直径在90~95 mm范围内,彗差拟合残差PV值才小于1 μm ,同时考虑到内圆直径在90 mm和95 mm两点处彗差拟合残差RMS值和PV值相差不大,所以选择95 mm作为内圆直径的最佳参数。

4.2 内圆厚度的参数选择

设计内圆直径 $D=95\text{ mm}$,外圆厚度 $d_2=20\text{ mm}$,镜面厚度 $d_3=2\text{ mm}$,改变内圆厚度,采用同样的仿真计算方法,各像差拟合残差面形的RMS值和PV值变化曲线如图9~11所示。

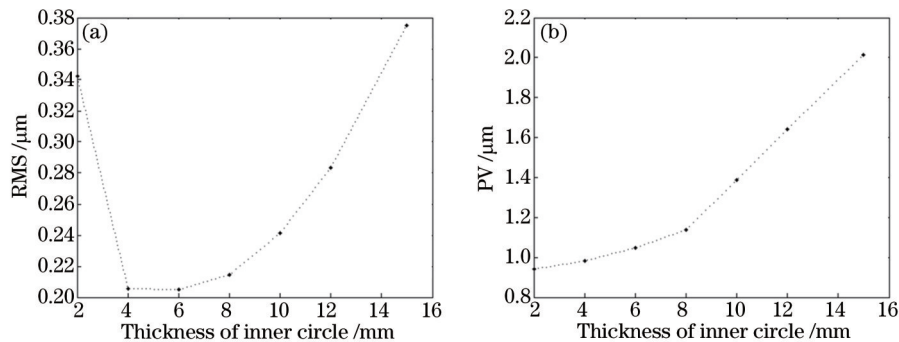


图9 拟合离焦残差面形随内圆厚度变化曲线。(a) RMS值;(b) PV值

Fig.9 Curve of residual focus error with thick of inner circle. (a) RMS; (b) PV

从图9~11可以看出,随着内圆厚度增加,离焦拟合残差RMS值先减小后增大,在5 mm处存在极小值,而PV值逐渐增大;像散拟合残差RMS值和PV值与离焦变化趋势一致,但变化范围不大,在4 mm处RMS值存在极小值;彗差拟合残差RMS值和PV值均是先减小后增大,分别在8 mm和10 mm处存在极小值,并且8 mm和10 mm处的RMS值和PV值相差不大,考虑到彗差拟合残差PV值应尽量小于1 μm 的因素,所以选择10 mm作为内圆厚度的最佳参数。

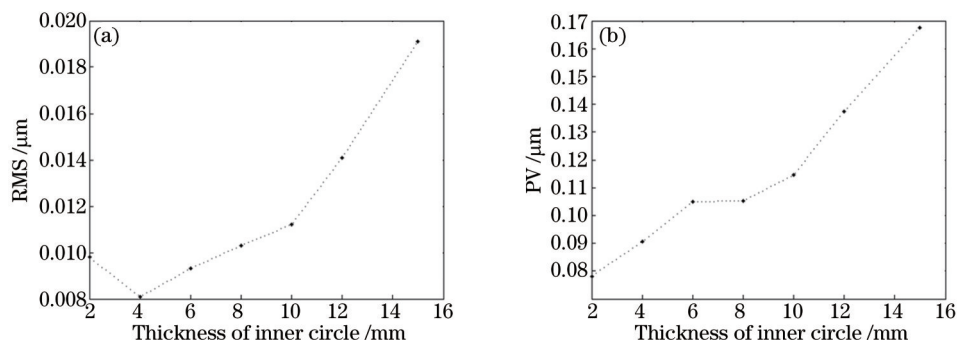


图 10 拟合像散残差面形随内圆厚度变化曲线。(a) RMS 值;(b) PV 值

Fig.10 Curve of residual astigmatism error with thick of inner circle. (a) RMS; (b) PV

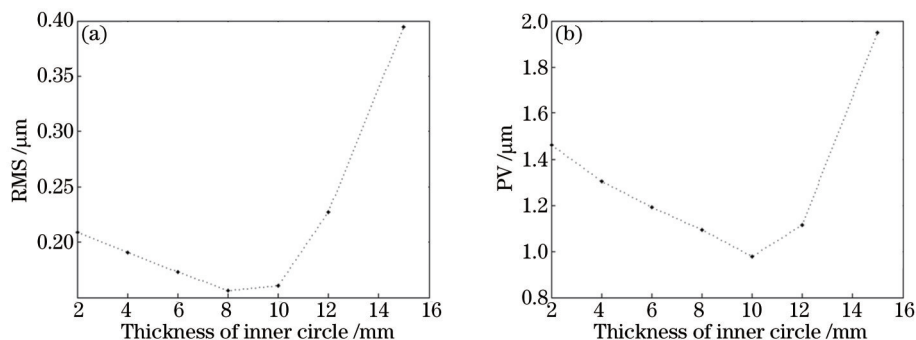


图 11 拟合彗差残差面形随内圆厚度变化曲线。(a) RMS 值;(b) PV 值

Fig.11 Curve of residual coma error with thick of inner circle. (a) RMS; (b) PV

4.3 外圆厚度的参数选择

设计内圆直径和厚度分别为 $D=95\text{ mm}$ 和 $d_1=10\text{ mm}$, 镜面厚度 $d_3=2\text{ mm}$, 改变外圆厚度, 像差拟合残差 RMS 值和 PV 值变化曲线如图 12~14 所示。

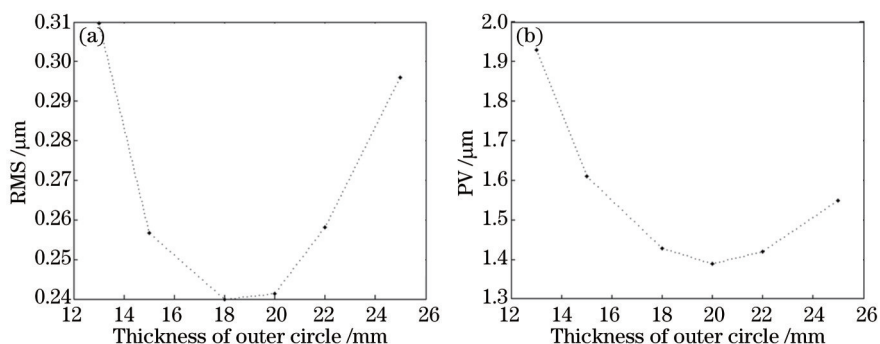


图 12 拟合离焦残差面形随外圆厚度变化曲线。(a) RMS 值;(b) PV 值

Fig.12 Curve of residual focus error with thick of outer circle. (a) RMS; (b) PV

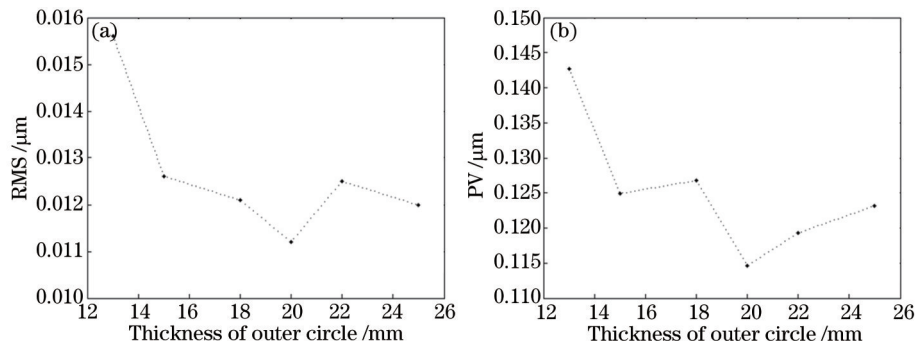


图 13 拟合像散残差面形随外圆厚度变化曲线。(a) RMS 值;(b) PV 值

Fig.13 Curve of residual astigmatism error with thick of outer circle. (a) RMS; (b) PV

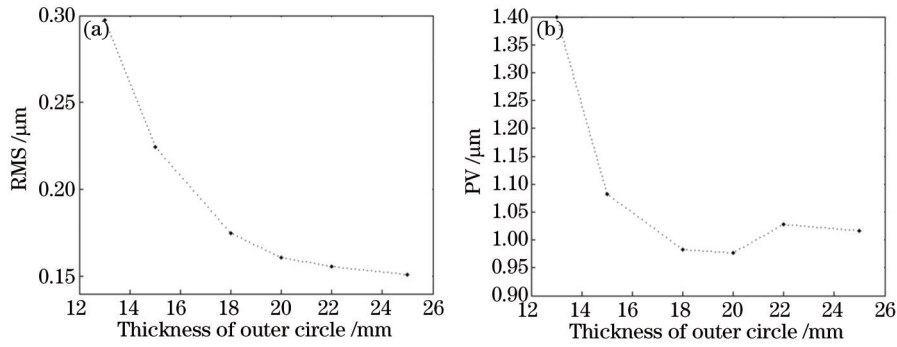


图14 拟合彗差残差面形随外圆厚度变化曲线。(a) RMS值;(b) PV值

Fig.14 Curve of residual coma error with thick of outer circle. (a) RMS; (b) PV

从图12~14可以看出,随着外圆厚度的增大,离焦拟合残差RMS值和PV值先减小后增大,分别在18 mm和20 mm处存在极小值;像散拟合残差RMS值和PV值整体趋势是先减小后增大,在个别点有跳变,在20 mm处的RMS值和PV值最小;彗差拟合残差RMS值逐渐减小,且趋势逐渐减缓,PV值先减小后缓慢变大,在20 mm处PV值小于1 μm ,综合考虑上述情况,选择20 mm作为外圆厚度的最佳参数。

4.4 镜面厚度的参数选择

镜架的最佳参数确定之后,下面讨论该镜架模型下对应的最佳镜面厚度参数,仍采用上述同样的仿真计算方法,改变镜面厚度,各像差拟合残差RMS值和PV值如图15~17所示。

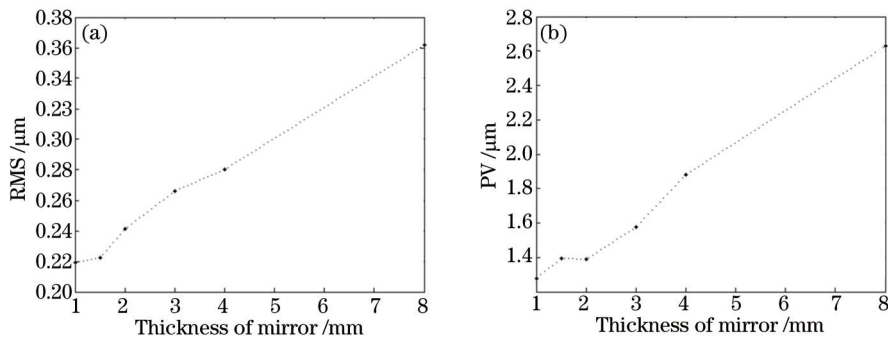


图15 拟合离焦残差面形随镜面厚度变化曲线。(a) RMS值;(b) PV值

Fig.15 Curve of residual focus error with thickness of mirror. (a) RMS; (b) PV

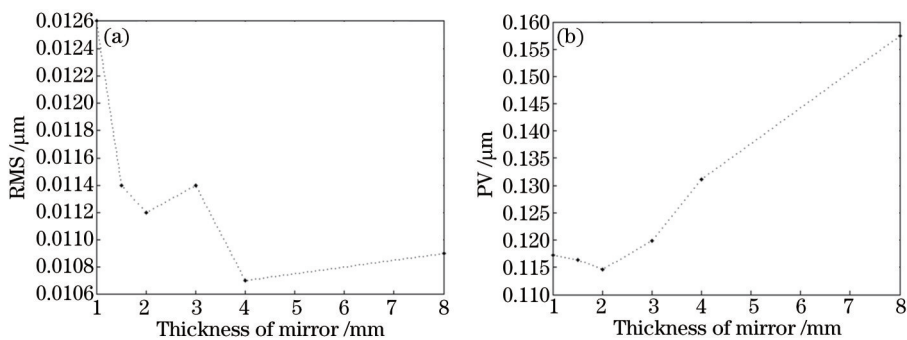


图16 拟合像散残差面形随镜面厚度变化曲线。(a) RMS值;(b) PV值

Fig.16 Curve of residual astigmatism error with thickness of mirror. (a) RMS; (b) PV

从图15~17可以看出,随着镜面厚度的增大,离焦、彗差拟合残差的RMS值和PV值逐渐增大,其中彗差拟合残差的PV值在镜面厚度1~4 mm范围内增大趋势不明显,这表明镜面厚度的增加只会让离焦、彗差的校正效果变差;像散拟合残差的RMS值呈曲折式下降,在4 mm处有最小值,PV值先缓慢减小后快速增大,在2 mm处存在极小值,综合考虑上述曲线变化情况,2 mm厚的镜面对低阶像差的校正效果较好。

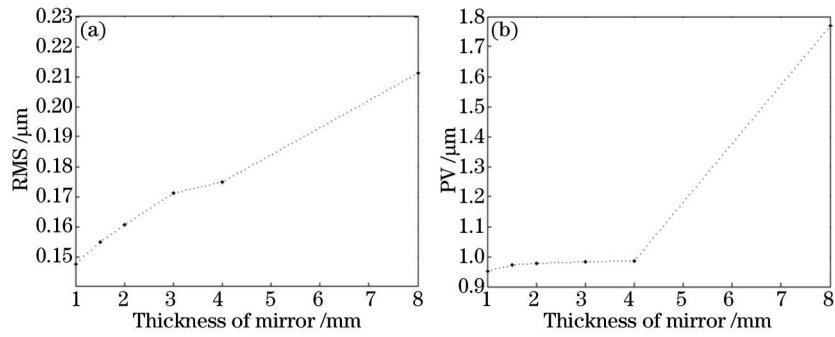


图 17 拟合彗差残差面形随镜面厚度变化曲线。(a) RMS 值;(b) PV 值

Fig.17 Curve of residual coma error with thickness of mirror. (a) RMS; (b) PV

5 最佳参数下对低阶像差校正的有限元仿真

通过仿真计算和分析,得到 4 臂边缘驱动变形镜的最佳参数如表 1 所示。

表 1 4 臂边缘驱动变形镜的最佳结构参数

Table 1 Optimal structure parameters of four-arm edge-driven deformable mirror

Item	Diameter of inner circle	Thickness of inner circle	Thickness of outer circle	Mirror thickness
Optimal parameter	95 mm	10 mm	20 mm	2 mm

根据以上参数构建有限元仿真模型,在各个驱动器上加载通过最小二乘法计算得到的位移,获得变形镜校正面形数据,再和 PV 值分别为 20、10、10 μm 的离焦、像散和彗差理想波面相减,得到拟合残差面形数据,结果如图 18~20 所示。通过程序处理可以得到相应的 RMS 值和 PV 值。

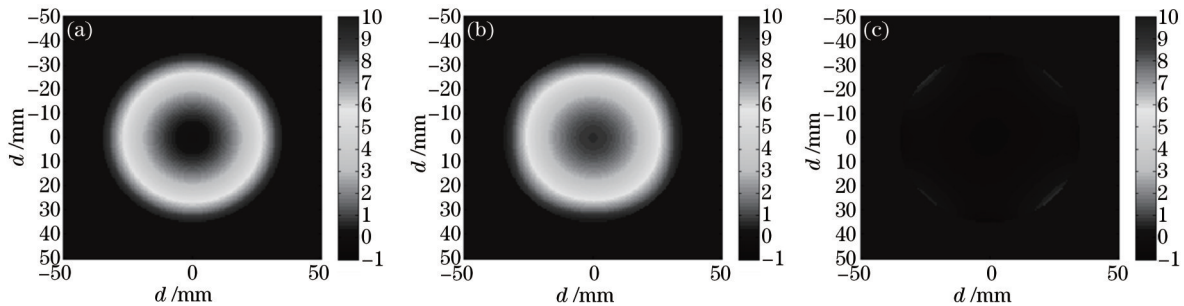


图 18 离焦校正。(a) 理想像差面形;(b) 校正像差面形;(c) 拟合残差面形

Fig.18 Focus correction.(a) Ideal aberration surface shape; (b) correction aberration surface shape; (c) residual aberration surface shape

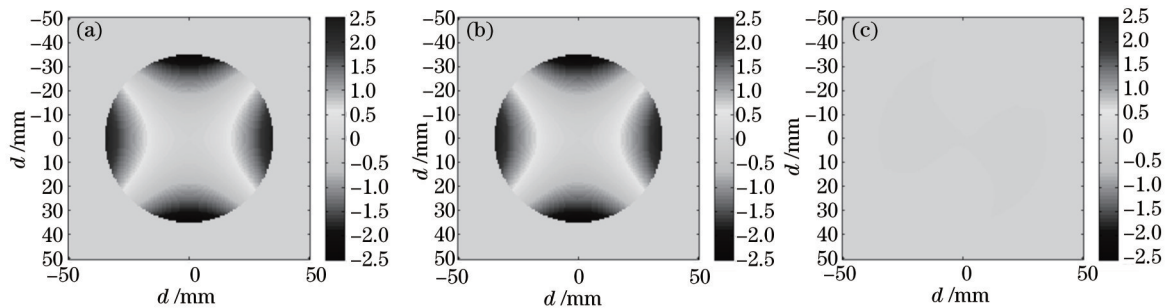


图 19 像散校正。(a) 理想像差面形;(b) 校正像差面形;(c) 拟合残差面形

Fig.19 Astigmatism correction.(a) Ideal aberration surface shape; (b) correction aberration surface shape;

(c) residual aberration surface shape

离焦拟合残差面形的 RMS 值和 PV 值分别为 0.2366、1.3762 μm ;像散拟合残差面形的 RMS 值和 PV 值分别为 0.0112、0.1146 μm ;彗差拟合残差面形的 RMS 值和 PV 值分别为 0.1606、0.9773 μm ,从以上图形和数据可以知道,该 4 臂边缘驱动变形镜对离焦、像散和彗差校正的拟合残差图形很模糊,表示残余像差很少,数据中表现出来就是 RMS 值和 PV 值很小,变形镜对像散校正效果最好,这是由于边缘驱动变形镜模型跟像散本

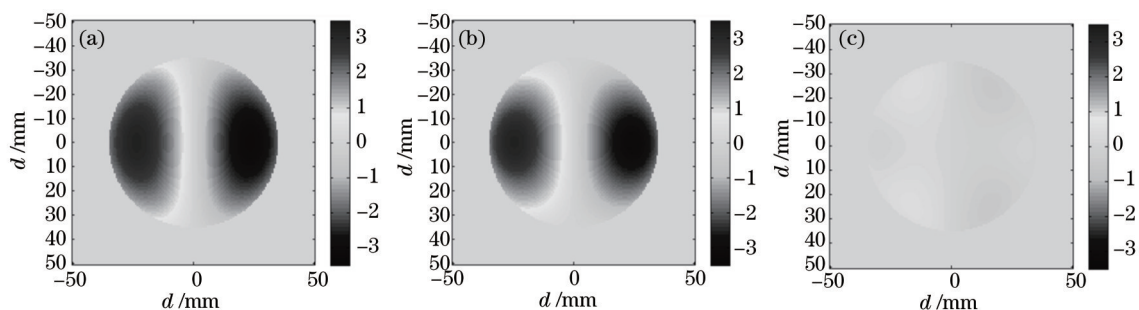


图20 彗差校正。(a)理想像差面形;(b)校正像差面形;(c)拟合残差面形

Fig.20 Coma correction.(a) Ideal aberration surface shape; (b) correction aberration surface shape; (c) residual aberration surface shape
 征模式契合度更高,对彗差校正效果稍差,不过拟合残差PV值仍小于 $1\ \mu\text{m}$ 。

对于PV值分别为 $20\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 的离焦、像散和彗差的组合像差,80%像差波前面形PV值为 $15\ \mu\text{m}$,RMS值为 $3.3154\ \mu\text{m}$,变形镜对其校正的情况如图21所示。经过对拟合残差面形进行计算,求得其PV值为 $4.2308\ \mu\text{m}$,RMS值为 $0.4062\ \mu\text{m}$,变形镜对组合像差的校正能力比校正单个特定像差有所下降。

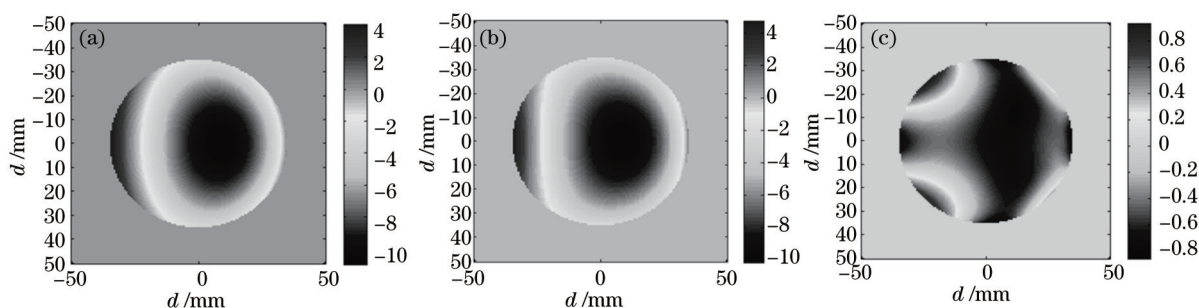


图21 组合像差校正。(a)理想像差面形;(b)校正像差面形;(c)拟合残差面形

Fig.21 Composite aberration correction.(a) Ideal aberration surface shape; (b) correction aberration surface shape; (c) residual aberration surface shape

通过有限元仿真还可以得到边缘驱动变形镜产生校正面形时镜面的应力分布,如图22所示。通过计算程序处理镜面变形应力分布数据,变形镜拟合离焦的最大应力为 $48\ \text{MPa}$,拟合像散的最大应力为 $5.8\ \text{MPa}$,拟合彗差的最大应力为 $37\ \text{MPa}$ 。数据表明在拟合离焦时,变形镜镜面承受的最大应力最大,拟合像散时承受的最大应力最小,不过它们都没有超过单晶硅材料能承受的最大应力 $85\sim 110\ \text{MPa}$ ^[30],变形镜可以正常工作。

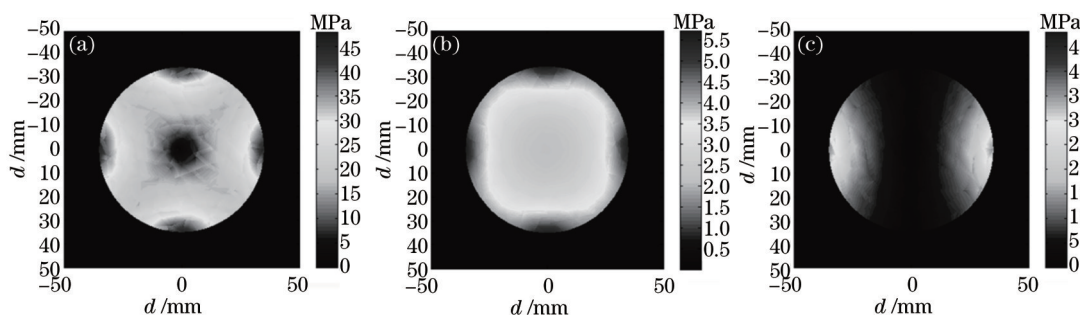


图22 变形镜像差校正的镜面应力分布。(a)离焦;(b)像散;(c)彗差

Fig.22 Deformable mirror's stress distribution of aberration correction. (a) Focus; (b) astigmatism; (c) coma

6 结 论

4臂边缘驱动变形镜在最佳结构参数(内圆直径为 $95\ \text{mm}$ 、内圆厚度为 $10\ \text{mm}$ 、外圆厚度为 $20\ \text{mm}$ 、镜面厚度为 $2\ \text{mm}$)下,通过8个驱动器作用能够较好的校正离焦、像散和彗差等低阶像差。对PV值分别为 $20\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 的离焦、像散和彗差,4臂边缘驱动变形镜拟合残差面形的RMS值和PV值分别为 $0.2366\ \mu\text{m}$ 和 $1.3762\ \mu\text{m}$, $0.0112\ \mu\text{m}$ 和 $0.1146\ \mu\text{m}$, $0.1606\ \mu\text{m}$ 和 $0.9773\ \mu\text{m}$,拟合离焦、像散和彗差时镜面最大应力分别为 $48\ \text{MPa}$ 、 $5.8\ \text{MPa}$ 、 $37\ \text{MPa}$,以上数据满足4臂边缘驱动变形镜技术需求。仿真计算结果为4臂边缘驱动变形镜的设计

方案提供了参考,具有一定实际意义。

参 考 文 献

- 1 Dong Jun, Wang Guangyu, Ren Yingying. Advances in passively Q -switched solid-state lasers based on composite materials[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601003.
董 俊,王光宇,任滢滢. 基于复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601003.
- 2 Luo Wei, Dong Wenfeng, Yang Huabing, *et al.*. Development trend of high power lasers[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 845-852.
罗 威,董文锋,杨华兵,等. 高功率激光器发展趋势[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 845-852.
- 3 Luo Wei, Yuan Shengfu, Zou Qianjin, *et al.*. Calculation of temperature and population distribution in DF laser cavity based on emission spectrum[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1668-1670.
罗 威,袁圣付,邹前进,等. 基于发射光谱的DF激光器光腔温度与粒子数分布[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1668-1670.
- 4 Wang Dan, Zhou Tangjian, Wang Juntao, *et al.*. Hundreds watts Nd:YAG slab laser amplifier with high beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10):1002001.
汪 丹,周唐建,王君涛,等. 百瓦级高光束质量Nd:YAG板条激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002001.
- 5 Sun Zhe, Chen Xin, Jiang Menghua, *et al.*. Compact side pumped double pass Nd:YVO₄ slab laser amplifier[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(11): 2111-2115.
孙 哲,陈 欣,姜梦华,等. 半导体泵浦双通Nd:YVO₄板条激光放大器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(11): 2111-2115.
- 6 Gao Qingsong, Hu Hao, Pei Zhengping, *et al.*. Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10 kW [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202001.
高清松,胡 浩,裴正平,等. 10 kW 固体板条激光放大器设计与实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202001.
- 7 Tu Bo, Jiang Jianfeng, Zhou Tangjian, *et al.*. Numerical simulation of medium temperature and stress for high power disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(S0): 121-124.
涂 波,蒋建锋,周唐建,等. 高功率薄片激光介质温度与应力数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(S0): 121-124.
- 8 Li Xiaoli, Shi Xiangchun, Shi Peng, *et al.*. Temperature effect of Yb:YAG thin disk laser crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(10): 1268-1271.
李 小 莉,施翔春,石 鹏,等. Yb:YAG薄片激光介质的温度效应[J]. 光学学报, 2001, 21(10): 1268-1271.
- 9 Mu Jian, Feng Guoying, Yang Huomu, *et al.*. District cooling method for thin disk-type laser media[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(11): 2527-2530.
母 健,冯国英,杨火木,等. 薄片激光介质分区域主动冷却方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2527-2530.
- 10 Mu Jian, Feng Guoying, Yang Huomu, *et al.*. Theoretical and experimental research on district cooling for thin disk-type laser medium[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12): 124204.
母 健,冯国英,杨火木,等. 分区域主动冷却薄片激光机制的理论和实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 124204.
- 11 Niu Saisai, Shen Jianxin, Liang Chun, *et al.*. Comparative study on the performace of deformable mirror of NIR based human eye aberration correction system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1795-1800.
钮赛赛,沈建新,梁 春,等. 基于近红外光谱的人眼像差校正系统中变形镜性能对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1795-1800.
- 12 Bi Yong, Zhai Jia, Wu Jinhu, *et al.*. One method for mirror surface figure treatment in optical instrument[J]. Optical Technique, 2009, 35(1): 10-13.
毕 勇,翟 嘉,吴金虎,等. 一种光学仪器镜面面形的处理方法[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 10-13.
- 13 Wang Xiaolin, Tao Rumao, Zhang Hanwei, *et al.*. 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good beam quality and high stability[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105001.
王 小 林,陶汝茂,张汉伟,等. 1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105001.
- 14 Han Kai, Wu Shuang, Zhang Bin. Effect of thermal distortions of cavity mirrors on output beam quality of high power lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(5): 1134-1138.
韩 开,吴 双,张 彬. 高功率激光器腔镜热变形对输出光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1134-1138.
- 15 Cherezova T Y, Kaptsov L N, Kudryashov, A V. Cw industrial rod YAG: Nd³⁺ Laser with an intracavity active bimorph mirror[J]. Applied Optics, 1996, 35(15): 2554-2561.
- 16 Dainty J C, Koryabin A V, Kudryashov A V. Low-order adaptive deformable mirror[J]. Applied Optics, 1998, 37(21): 4663-4668.

- 17 Liu Wenjin, Ning Yu, Dong Lizhi, *et al.*. Aberration correction ability of bimorph deformable mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1611-1614.
刘文劲, 宁禹, 董理治, 等. 双压电片变形镜像差校正能力[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1611-1614.
- 18 Yu Hao, Huang Linhai, Huang Lixin, *et al.*. Experiment of full field compensation with two-deformable mirrors adaptive optics system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1542-1546.
余浩, 黄林海, 黄利新, 等. 双变形镜自适应光学系统全场补偿实验验证[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1542-1546.
- 19 Yan Hu, Lei Xiang, Liu Wenjin, *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.
- 20 Lee J H, Uhm T K, Youn S K. First-order analysis of thin-plate deformable mirrors[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2004, 44(6): 1412-1416.
- 21 Vdovin G, Kiyko V. Intracavity control of a 200-W continuous-wave Nd: YAG laser by a micromachined deformable mirror[J]. Optics Letters, 2001, 26(11): 798-800.
- 22 Wang Weimin, Tao Fenggang, Yan Shengmei, *et al.*. Study on a novel segmented micro-deformable mirror with tip-tilt motion[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0716002.
汪为民, 陶逢刚, 颜胜美, 等. 新型分立倾斜式变形镜研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0716002.
- 23 Zhang Y H, Poonja S, Roorda A. Adaptive optics scanning laser ophthalmoscope using a micro-electro-mechanical (MEMS) deformable mirror[C]. SPIE, 2006, 6138: 61380Z.
- 24 Cornelissen S A, Bierden P A, Bifano T G. A 4096 element continuous facesheet MEMS deformable mirror for high-contrast imaging [C]. SPIE, 2008, 6888: 68880V.
- 25 Lemaitre G R. Active Optics: Vase or Meniscus multimode mirrors and degenerated monomode configurations[J]. Meccanica, 2005, 40(3): 233-249.
- 26 Hugot E, Lemaitre G R, Ferrari M. Active optics: Single actuator principle and angular thickness distribution for astigmatism compensation by elasticity[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1401-1409.
- 27 Hugot E, Ferrari M, El Hadi K, *et al.*. Active Optics: Stress polishing of toric mirrors for the VLT SPHERE adaptive optics system [J]. Applied Optics, 2009, 48(15): 2932-2941.
- 28 Laslandes M, Hugot E, Ferrari M. Active Optics: Deformation systems compensating for optical aberrations with a minimum number of actuators[C]. SPIE, 2012, 8450: 84500J.
- 29 Lemaitre G R. Optical design and active optics methods in astronomy[J]. Optical Review, 2013, 20(2): 103-117.
- 30 Allen L N, Romig H W. Advanced optical manufacturing and testing[C]. SPIE, 1990: 1333.

栏目编辑: 史敏