

强激光辐照对变形镜补偿能力影响的实验研究

封 斐 魏斌斌* 刘文广 姜宗福 周 琼

国防科学技术大学光电科学与工程学院高能激光技术湖南省重点实验室,
大功率光纤湖南省协同创新中心, 湖南 长沙 410073

摘要 连续面形分立驱动变形镜(CFDA-DM)是自适应光学系统中最重要器件。在高能激光系统中,此种变形镜(DM)很容易产生热变形,这对DM的补偿能力和输出光束质量有较大影响。通过构建实验平台对DM热变形进行研究,利用功率为2.5 kW的激光对DM镜面连续辐照130 s,镜面波前峰谷值(d_{PV})由辐照前的 0.0806λ 增长到 0.5423λ ,面形像差中高阶成分有 0.1220λ ,低阶成分主要是离焦和像散。利用DM将波前 d_{PV} 为 0.4853λ 的 0° 像散补偿到 d_{PV} 为 0.0707λ 后再用功率为2.5 kW的激光对DM镜面连续辐照180 s,此时波前 d_{PV} 由 0.0707λ 增加到 0.7548λ ,其中高阶成分有 0.2487λ 。可见热变形不但产生低阶像差,还产生较大成分的高阶像差。此高阶像差不能用DM自身进行校正,是影响高能激光系统输出光束质量的重要因素。

关键词 自适应光学; 热形变; 像差补偿; 变形镜

中图分类号 TN248; O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.120101

Experimental Study of Impact of High Power Laser Irradiation on Compensation Ability of Deformable Mirrors

Feng Fei Wei Binbin Liu Wenguang Jiang Zongfu Zhou Qiong

Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, School of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Continuous faceplate discrete actuator deformable mirror (CFDA-DM) is the most important device in adaptive optics. In high power laser systems, this kind of deformable mirror (DM) is apt to produce thermal deformation, which can seriously affect the compensation ability of DM and the output beam quality. Experimental platform is set up to study DM thermal deformation. In the experiment, when DM is continuously irradiated by 2.5 kW laser for 130 s, the peak-to-valley value (d_{PV}) of wavefront increases from 0.0806λ (before irradiation) to 0.5423λ , the higher order aberration of faceplate is 0.1220λ , and the low order aberration is mainly defocus and astigmatism. After d_{PV} of a zero degree astigmatism is compensated from 0.4853λ to 0.0707λ , DM is irradiated by 2.5 kW laser for 180 s again. In consequence, the d_{PV} of wavefront increases from 0.0707λ to 0.7548λ , and the higher order aberration of wavefront is 0.2487λ . The above results show that the thermal deformation does not only lead to lower order aberration, but also produce higher order aberration, which cannot be compensated by DM itself. The higher order aberration is the key factor that influences the output beam quality of high power laser systems.

Key words adaptive optics; thermal deformation; aberration compensation; deformable mirror

OCIS codes 010.1080; 140.3300; 140.7300

收稿日期: 2016-08-01; 收到修改稿日期: 2016-08-15; 网络出版日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(11504423)

作者简介: 封 斐(1991—),男,硕士研究生,主要从事强激光光束控制方面的研究。E-mail: 292235052@qq.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高能激光器技术、光束控制与气动光学方面的研究。

E-mail: jiangzongfu28@163.com

* 通信联系人。E-mail: weibb@hotmail.com

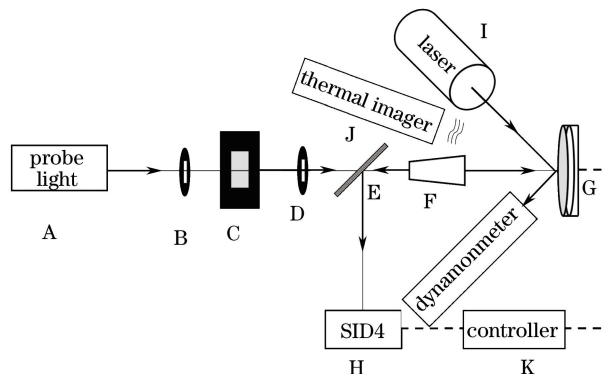
1 引言

自适应光学在提高高能激光系统光束质量方面具有重要作用。波前校正器是自适应光学系统三大重要组成部分之一^[1]。目前最常用的一种波前校正器是连续面形分立驱动变形镜(CFDA-DM),它具有高光能利用率、小波前拟合误差、高空间分辨率、能保持相位连续和易于抛光镀膜等优点^[2]。在一般工作条件下,这种变形镜(DM)可以很好地完成像差校正。然而,当激光系统输出功率较大时,即使采用反射率很高的镜面,镜面吸收的热量也是相当可观的^[3]。此时由于热造成的DM镜面面形变化将十分显著,这会影响自适应光学系统的校正能力和输出光束质量^[4-6],因此DM热形变对光束质量的影响是目前国内外研究的热点。四川大学的胡小川等^[7-8]利用Ansys仿真分析了DM热变形及其对光束质量的影响,结果表明DM极头间距越窄,热变形带来的波前畸变空间频率越高。国防科学技术大学的魏斌斌等^[9-10]对39单元CFDA-DM的热变形进行了仿真分析,发现热变形主要引起低阶像差,尤其以离焦为主,但除去所有低阶成分后,剩余的高阶残差峰谷值(d_{PV})仍接近整个面形 d_{PV} 的一半,且高阶残差的分布与驱动器布局相对应。本文利用一块39单元的DM构建了一套实验装置,对DM的热变形进行实验研究,以揭示热变形对DM自身校正能力和系统输出光束质量的影响,对DM的进一步发展和光学器件选型提供参考。

2 实验方法

热形变是指激光辐照镜面产生热分布、继而产生应力分布并导致镜面形变的过程,因此实验中应该包含两个光路,即辐照光路和探测光路。整块平面反射镜的热形变与DM的热形变的区别在于DM热形变中存在高阶像差。为了探测到DM热形变中的高阶像差,实验采用高空间分辨率的SID4四波剪切干涉仪。实验中像差均采用波长为 λ 单位,其参考波长为 $0.65\ \mu\text{m}$ 。

实验光路图如图1所示。图中包含探测光源A、起偏器B、空间光调制器C、检偏器D、分光镜E、扩束系统F、变形镜G、SID4四波剪切干涉仪H、高能光纤激光器I、热像仪J以及控制器K。探测光源采用波长为 $650\ \text{nm}$ 的半导体激光器,其最大输出功率为 $0.25\ \text{mW}$;辐照光源采用波长为 $1080\ \text{nm}$ 的光纤激光器,其最大输出功率为 $3\ \text{kW}$ 。辐照光的入射角和光束质量对DM形变结果的影响已经通过标定消除,其能量分布对实验结果的影响并不大,因此不做具体论述。扩束系统的放大倍数为6。DM采用中国科学院光电技术研究所研制的39单元CFDA-DM。DM驱动器采用六边形的方式分布,布局结构如图2所示,其具体结构参数如表1所示。液晶空间光调制器采用Reallight公司生产的 $633\ \text{nm}$ 透射式液晶空间光调制器。SID4为Phasics公司生产的四波剪切干涉仪。图1中探测光源、起偏器、空间光调制器、检偏器、扩束系统、SID4等构成了探测光路,高能光纤激光器和功率计组成辐照光路。实验过程为:在辐照光路中用高能激光对DM进行辐照,使DM产生一定的热变形,用功率计对辐照功率进行测量,然后探测光源发出探测光经DM表面反射,由SID4测其反射光的波前数据,从而得到DM的热变形情况。实验中高能光纤激光器输出的是一束



A: probe source; B: polarizer; C: spatial light modulator; D: polarization analyzer; E: beam splitter mirror; F: beam expander; G: DM; H: four wave shearing interferometer (SID4); I: high-energy laser; J: thermal imager; K: controller

图1 实验光路原理图

Fig. 1 Principle diagram of experimental light path

$\Phi 25$ mm(Φ 为光斑直径)的准直光束,因为镜面镀有 22.5° 的高反膜,所以光斑照射到镜面后将变为椭圆形。因此实验中探测光路选取镜面中心 $\Phi 40$ mm区域进行面形探测。实验中的测量为相对测量。

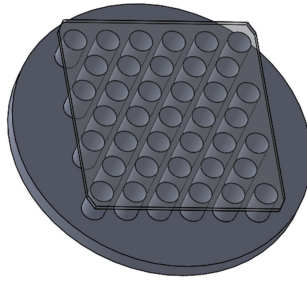


图2 DM驱动器布局

Fig. 2 Distribution of DM actuator

表1 DM结构参数

Table 1 Structure parameters of DM

Mirror face	Thickness /mm	Length /mm	Width /mm	Membrane layer absorption coefficient
	1.4	64	60	1%
Actuator	Length /mm	Diameter /mm	Pitch /mm	
	10	7	10	
Foundation bed	Thickness /mm	Diameter /mm		
	5	90		

3 DM热变形实验

DM即使在非工作状态下经辐照后也会产生较大热变形,其中高阶成分较为可观^[4],且此高阶成分分布与极头间距有关^[3]。DM的热变形实验是为了考察DM在非工作状态下的热变形,并对文献[9]的仿真结果进行验证。

将实验光路图1中的像差产生装置B、C、D移除,用平面波对DM在非工作状态下的热变形进行探测。采用功率为2.5 kW的光纤激光对镜面照射130 s,使DM产生热变形。辐照前的波前如图3所示,其初始面形在 $\Phi 40$ mm区域内的波前峰谷值 d_{PV} 为 0.0806λ ,波前均方根差 x_{rms} 为 0.01566λ 。辐照130 s后测得的DM热变形后的波前如图4所示,在 $\Phi 40$ mm区域内波前峰谷值 d_{PV} 为 0.5423λ ,波前均方根差 x_{rms} 为 0.1021λ 。图5给出了辐照后66阶以上Zernike多项式组成的高阶残差,图中 $\Phi 40$ mm区域内波前峰谷值 d_{PV} 为 0.122λ ,波前均方根差 x_{rms} 为 0.01392λ 。热像仪测得的镜面温度变化曲线如图6所示,图中给出了镜面所选 $\Phi 40$ mm区域内最低温度(T_{min})、最高温度(T_{max})以及平均温度(T_{ave})随时间的变化曲线。图7给出辐照后面形的前66阶Zernike多项式拟合系数的分布。

由图4可以看出,激光辐照后DM镜面出现了较大的热变形,其波前 d_{PV} 由初始的 0.0806λ 增长到

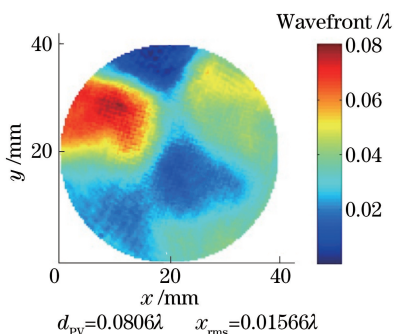


图3 辐照前的波前

Fig. 3 Wavefront before irradiation

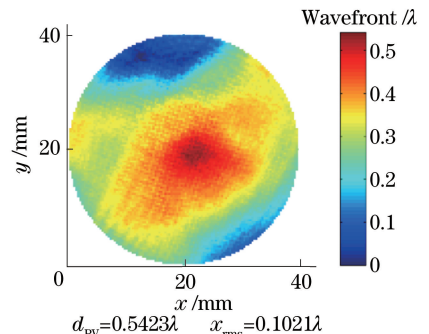


图4 辐照后的波前

Fig. 4 Wavefront after irradiation

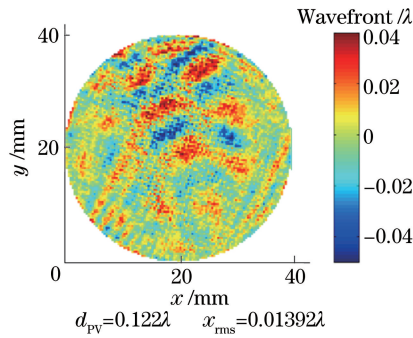


图 5 激光辐照后波前 66 阶以上 Zernike 多项式组成的高阶残差

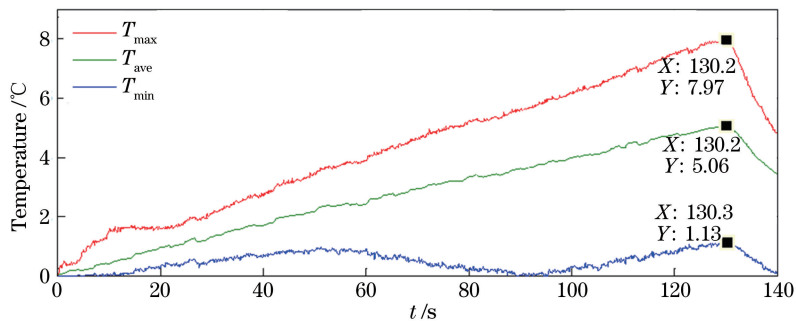
Fig. 5 Higher order residual aberration made up of Zernike polynomial above 66th order of wavefront after irradiation

图 6 激光辐照过程中镜面温度的变化

Fig. 6 Change of mirror face temperature in the process of irradiation

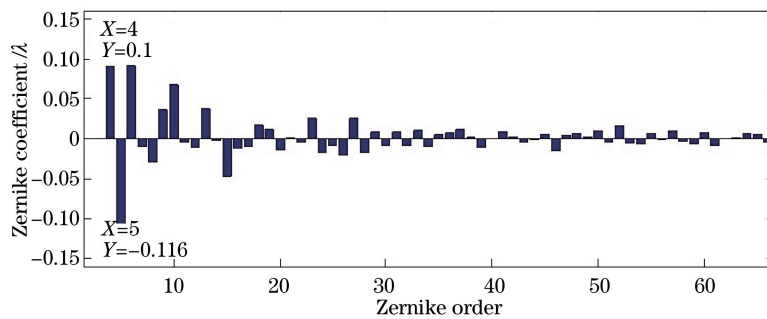


图 7 激光辐照后前 66 阶 Zernike 多项式拟合系数分布

Fig. 7 Distribution of 1st to 66th order Zernike polynomial fit coefficient after irradiation

0.5423λ, 其中高阶像差有 0.122λ。由图 7 可以看出, 激光辐照后镜面的热形变像差主要以第 5 项离焦和第 4、6 项像散为主, 这 3 项的 Zernike 系数均达到了 0.1λ 以上, 这与文献[4]中的仿真结果吻合得较好。由图 6 可以看出, 激光辐照后镜面最高温度以及平均温度随着辐照时间基本呈线性增长, 而最低温度则略有波动。激光停止辐照后上述温度均迅速下降。实验过程中室内温度保持恒定, 期间镜面温度最高达 7.97 °C, 此时也观察到镜面有明显的热变形。

4 DM 在激光辐照下的像差补偿能力实验

热形变不仅影响非工作状态下的 DM 面形, 还会使得工作状态下的 DM 产生额外形变, 消耗驱动器行程, 影响 DM 的像差补偿能力^[4]。

在图 1 的实验光路中利用像差产生装置 B、C、D 来模拟初始波前像差。通过像差产生装置向系统中引入 0° 像散, 其 Zernike 系数为 0.2330λ。干涉仪测得此时的波前表面形如图 8(a) 所示, 图 8(b) 给出了此波前的低阶像差系数, 波前峰谷值 d_{PV} 为 0.4853λ, 波前均方根差 x_{rms} 为 0.09745λ。然后利用 DM 对此波前像差进行补偿, 补偿后的波前表面形如图 9(a) 所示, 其波前峰谷值 d_{PV} 降到了 0.0707λ。图 9(b) 给出了补偿后波前的

高阶成分分布。接着利用 2.5 kW 的高能激光对镜面辐照,为了使热变形更加显著,此次辐照时长延至 180 s。再次利用干涉仪对波前面形进行测量,所得波前面形如图 10 所示。图 10(a)为辐照后的面形,图 10(b)为辐照后面形的高阶成分。图 11 给出了辐照前后波前面形的前 66 阶 Zernike 多项式拟合系数分布的对比。

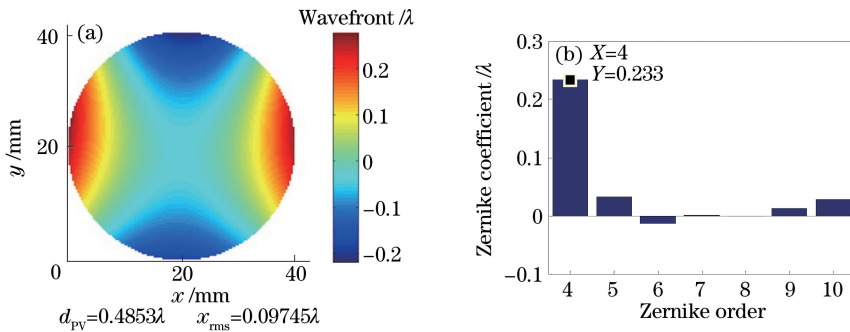


图 8 DM 补偿前的(a)波前像差面形及(b)其像差系数分布

Fig. 8 (a) Aberration shape of wavefront and (b) aberration coefficient distribution of DM before compensation

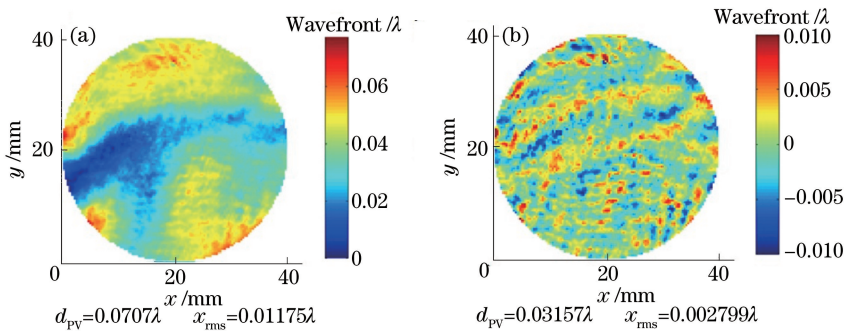


图 9 (a) 补偿后的波前面形;(b) 补偿后波前面形的 66 阶以上的高阶成分组成的面形

Fig. 9 (a) Wavefront shape after compensation; (b) wavefront shape made up of above 66th order Zernike polynomial after compensation

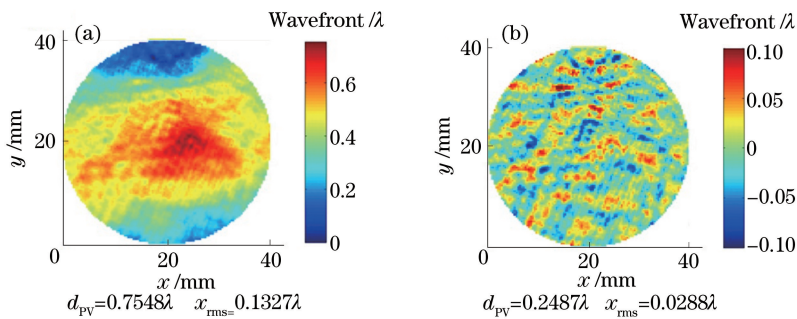


图 10 (a) 激光辐照后的波前面形;(b) 辐照后波前面形的 66 阶以上高阶成分组成的面形

Fig. 10 (a) Wavefront shape after irradiation; (b) wavefront shape made up of above 66th order Zernike polynomial after irradiation

由图 9 可见,DM 在没有激光辐照的情况下对 0° 像散有较好的补偿效果,补偿后 d_{PV} 降低到 0.0707λ ,66 阶以上的高阶成分也只有 0.0316λ 。但从辐照后的波前面形图(图 10)可见,DM 出现了较大的热变形,波前峰谷值 d_{PV} 达到了 0.7548λ ,其中高阶成分为 0.2487λ 。从辐照前后波前面形的前 66 阶 Zernike 多项式拟合系数分布对比图(图 11)可以发现,辐照后离焦和像散等低阶像差增大较多,20 阶以后的高阶成分像差系数也有较大程度的增加。为进一步补偿由于热形变引入的额外像差,压电陶瓷必须产生更多的位移量,这对 DM 的像差补偿能力产生了一定影响。此外,热形变引入了较大的高阶像差,而此高阶像差并不在该 DM 的补偿范围之内,并最终随光束输出,这也对 DM 的像差补偿能力产生了较大影响。

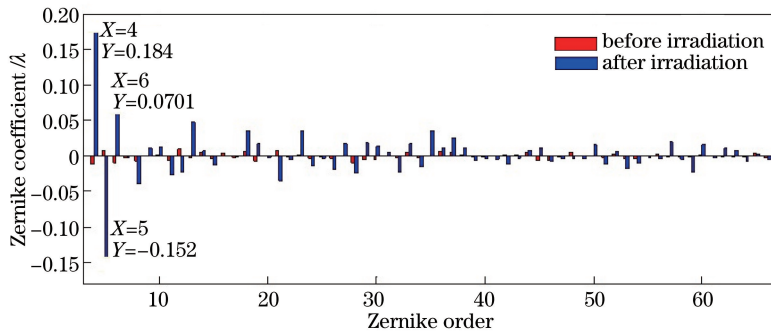


图 11 辐照前后波前面形的前 66 阶 Zernike 多项式拟合系数分布对比

Fig. 11 Comparison of 1st to 66th Zernike polynomial fit coefficient of wavefront before and after irradiation

采用数值仿真的方法对剩余高阶像差引起的光束质量下降问题进行了简单计算。假设理想光束的斯特列尔比为 1, 考虑高阶残差后光束的斯特列尔比为 0.85。可见, 高阶残差对光束质量有较大的影响。

5 结 论

激光辐照下 DM 热形变情况和辐照对 DM 补偿能力的影响实验表明:

1) DM 在非工作状态下的热变形主要为离焦和像散等低阶像差, 也有部分高阶像差存在。

2) 在没有激光辐照时, DM 对 0° 像散有较好的补偿, 补偿后高阶残差较小。对工作状态下的 DM 进行激光辐射, 热变形较大, 主要为低阶像差, 但也有较大成分的高阶像差存在, 此高阶像差不能用同一 DM 进一步补偿, 最终会影响高能激光系统的输出光束质量。

3) 为对 DM 补偿后的残余高阶像差进行补偿, 必须用更多单元数的 DM, 这会产生更高阶的像差。更多单元数意味着更加复杂庞大的系统, 因此有必要研制新型的不产生高阶残差的低阶 DM。

此实验结果及结论对高功率激光系统光束控制器件的选型和优化具有参考意义。

参 考 文 献

- Zhou Renzhong. Adaptive optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.
周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- Yang Huaifeng. Study of wavefront correction technique based on combinational-deformation-mirror for improving spatial compensation capability of the adaptive optics system[D]. Beijing: National University of Defense Technology, 2008.
杨华峰. 用于提高自适应光学系统空间校正能力的组合变形镜波前校正技术研究[D]. 北京: 国防科学技术大学, 2008.
- Wang Zheen, Qian Zheng. Measurement of dynamic distortion of laser mirrors[J]. Lasers, 1982(3): 167-170.
王哲恩, 钱 铮. 激光反射镜动态形变的测量[J]. 激光, 1982(3): 167-170.
- Zhou Qiong, Jiang Zongfu, Xi Fengjie. Designing of scaling model and study of thermal deformation compensation for inner optical system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0402008.
周 琼, 姜宗福, 习锋杰. 内光路系统的缩放模型及其热变形像差的波前预补偿[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0402008.
- Zhou Qiong, Jiang Zongfu, Xi Fengjie. Study of thermal deformations induced optical aberrations for Al₂O₃ mirror in an optical system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1002001.
周 琼, 姜宗福, 习锋杰. 光学系统中白宝石分光镜的热变形像差分析[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1002001.
- Gao Haijun, Cheng Zhaogu, Zhao Quanzhong, et al. Effect of resonator thermal deformation on focusing characteristics in flying optics for a high power CO₂ laser[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(10): 875-878.
高海军, 程兆谷, 赵全忠, 等. 输出耦合镜热形变对聚焦特性的影响及其实时补偿[J]. 中国激光, 2002, 29(10): 875-878.
- Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, Zhang Bin. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102003.
胡小川, 彭家琪, 张 彬. 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102003.
- Hu Xiaochuan, Wang Du, Chen Lixia, et al. Effect analysis of self-correction method based on the prediction model of

- deformable mirror with thermal deformation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1202001.
- 胡小川, 王 度, 陈丽霞, 等. 基于变形镜热形变预估模型的自校正效果分析[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1202001.
- 9 Wei B B, Liu W G, Xie K, *et al.* Analysis on laser-induced thermoelastic deformation of DMs[C]. SPIE, 2014, 9266: 926608.
- 10 Wei B B, Liu W G, Xie K, *et al.* Dependence of the influence function on laser-induced thermoelastic deformation of deformable mirrors[C]. SPIE, 2015, 9255: 925535.