

DOI: 10.12086/oe.2018.180049

“神光-III”主机装置的自适应光学波前校正系统

杨泽平^{1,2,3}, 李恩德^{1,2*}, 张小军^{1,2}, 凡木文^{1,2},
施宁平^{1,2}, 魏 凌^{1,2}, 龙国云^{1,2}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

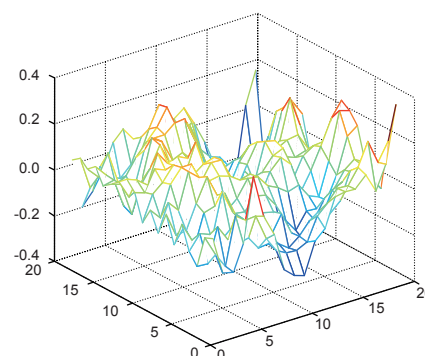
摘要: 本文介绍了为“神光-III”主机装置研制的五十套工程化自适应光学系统, 包括系统技术方案, 基于可拆卸技术的大口径变形镜和具有自动对准功能的哈特曼波前传感器两主要部件的性能, 测量并分析了波前特性, 系统校正结果表明: 自适应光学系统改善了主机装置的光束质量, 满足 10 倍衍射极限范围内激光能量大于 95% 的指标要求, 确保“神光-III”主机装置激光在主放大系统内的传输顺畅。

关键词: 神光-III; 自适应光学; 波前校正

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

引用格式: 杨泽平, 李恩德, 张小军, 等. “神光-III”主机装置的自适应光学波前校正系统[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 180049



Adaptive optics correction systems on Shen Guang III facility

Yang Zeping^{1,2,3*}, Li Ende^{1,2*}, Zhang Xiaojun^{1,2}, Fan Muwen^{1,2},
Shi Ningping^{1,2}, Wei Ling^{1,2}, Long Guoyun^{1,2}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

Abstract: The fifty engineered-manufacture adaptive optics systems developed for the Shen Guang III (SGIII) facility, are introduced in this paper. The system technical scheme, together with the key components – the dismountable large aperture deformed mirror and the auto-alignment Shack-Hartmann wavefront sensor, are presented. The characteristic of the wavefront is measured and analyzed. The result of system correction shows that the adaptive optics systems improved the beam quantity of the SGIII facility, meet the requirement that the laser beam energy is higher than 95% in the 10-time diffraction limit zone, and ensured the laser transmission in the main amplification system of the SGIII facility.

Keywords: Shen Guang III (SGIII) facility; adaptive optics; wavefront correction

Citation: Yang Z P, Li E D, Zhang X J, et al. Adaptive optics correction systems on Shen Guang III facility[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 180049

收稿日期: 2018-01-16; 收到修改稿日期: 2018-02-12

作者简介: 杨泽平(1970-), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事自适应光学研究。E-mail: zpyang@ioe.ac.cn

通信作者: 李恩德(1976-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事自适应光学研究。E-mail: liende@ioe.ac.cn

1 引言

在惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)高功率固体激光装置中,系统的静态波前畸变和动态相位变化是导致光束质量下降的两方面原因。其中静态波前畸变主要来源于大口径光学元件的加工误差、材料的非均匀性等缺陷以及光学装校过程带来的元件面形变化等;动态波前畸变主要来源于激光泵浦过程中光学元件的热变形和工作环境所带来的畸变。激光光束质量的下降给 ICF 激光系统带来光束聚焦特性下降、等离子体堵孔和三倍频效率下降等问题。

自适应光学技术这样的主动波前控制手段才是解决 ICF 激光系统中光束质量问题的根本途径。在世界各国的 ICF 激光装置中,自适应光学系统已经成为这些系统的基本组成部分。在美国国家点火装置(NIF)^[1-2]中,采用了一块 400 mm×400 mm 的大口径变形镜来控制光束质量;在 OMEGA EP^[3]装置中,采用了两块 400 mm×400 mm 的大口径变形镜来控制激光波前;而在日本的 GEKKO XII^[4]中,则采用了两块小口径变形镜和一块大口径变形镜来对系统中的波前分段进行精密控制。

国内,中国科学院光电技术研究所于 1985 年在世界上首次将自适应光学技术用于 ICF 驱动器的波前控制,在“神光-I”系统上建立了基于 19 单元变形镜和远场焦斑优化控制技术(高频振动爬山法)的自适应光学系统^[5],将激光器输出光束远场峰值能量提高了 3 倍,被称之为“中国方法”。从 1999 年开始,在“神光-III”原型装置的多程放大系统研制了一套基于近场相位控制技术的自适应光学系统,用于 ICF 激光装置上波前控制技术的原理性研究,该系统采用了一块 45 单元的、75 mm×75 mm 的变形镜,用哈特曼传感器作为波前探测器件,将系统的像差由 13.79 μm 校正到了 2.87 μm,实现了超过 10 μm 的波前校正^[6-9];在随后的“神光-III”原型装置上建立了 8 套小规模工程化自适应光学系统,每套自适应光学系统包括一块最大通光口径为 80 mm×80 mm 的 45 单元变形镜和一台 22×22 的微透镜阵列,动态范围为不小于±5 μm 的哈特曼波前传感器。实现了到靶点的全系统静态像差校正,改善了靶点焦斑能量分布,并首次验证了校正对打平面靶时 X 射线分布的改善效果^[10-12]。

本文报道了“神光-III”主机装置中的 50 套工程化自适应光学系统、包括基于可拆卸变形镜技术研制的 39 单元大口径变形镜、具有自动对准功能的哈特曼波

前传感器和全网络多路并行无人值守的控制组件的最新结果。

2 系统结构

“神光-III”主机装置波前校正系统采用自适应光学波前控制技术,实现对装置主放大系统中静态波前畸变和主激光发射时由泵浦过程产生的动态波前畸变的校正。

在“神光-III”原型装置中的自适应光学系统中,变形反射镜设置在主放大器入口处,口径比较小,工作时将校正全系统波前误差的校正量施加在变形镜上,激光在放大器中的传输过程中,逐步抵消放大器各个光学元件产生的波前误差,所以在放大器的初始段,光束带有较大的波前误差,在放大器中的空间滤波器小孔处的聚焦光斑比较大,容易受到遮挡,影响激光束完整地穿过小孔。为此,在本系统中将变形反射镜设置在主放大器的端镜处,激光在主放大器反射一次后,在放大器出口处,旋转 90°再次返回放大器和端镜放大。在端镜处的变形反射镜经过两次反射,因此所需的校正行程可以减少,穿过空间滤波器小孔时的焦斑也相应缩小,有利于激光过孔,但需要更大口径的变形反射镜。

“神光-III”主机装置共输出 48 束激光,每一束激光配置一套波前校正系统,每一套波前校正系统包括一套在腔镜位置的变形反射镜、在主放测量包内的一套哈特曼传感器、并配置相应的光、机、电组件,构成对 48 束激光波前闭环控制的波前校正系统。

自适应光学系统包含一块放置在腔镜位置的 39 个驱动单元的变形反射镜;一台位于参数诊断包 PMU04 内的哈特曼传感器。其中,变形镜与激光装置的入瞳位置成共轭关系,哈特曼传感器与变形镜成共轭关系。具体如图 1 所示。

2.1 自适应光学系统

“神光-III”主机装置自适应光学系统中采用了 48 套高精度面形、高损伤阈值的大口径变形反射镜。变形镜和哈特曼传感器之间的匹配关系如图 2 所示。每块变形镜包括 39 个基于 PZT 的驱动器,驱动器有效工作行程为±5 μm,最大通光口径为 360 mm×360 mm、校正工作口径 320 mm×320 mm。哈特曼传感器包括了 22×22 的微透镜阵列,有效子孔径数为 484 个,动态范围为不小于 15 μm。

图 2 为变形镜和哈特曼传感器布局 and 匹配关系,

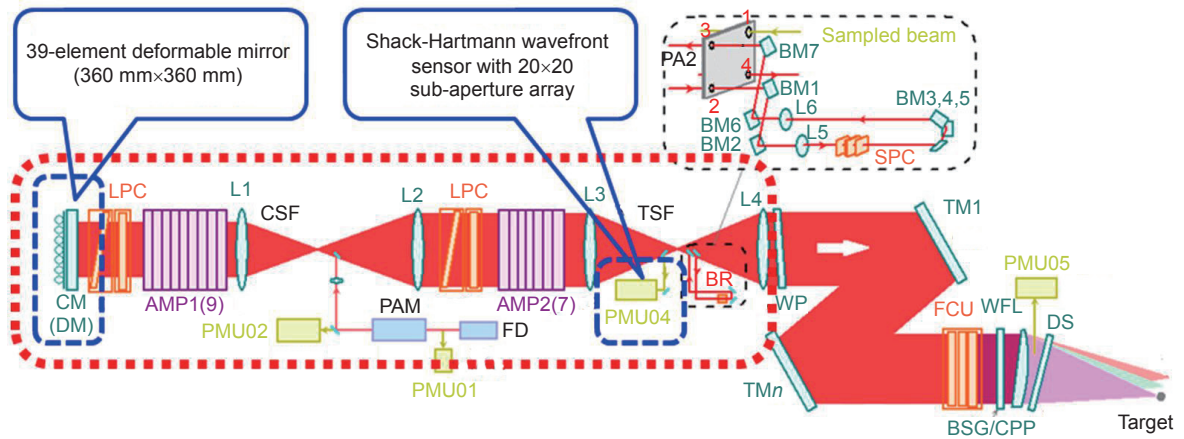


图1 “神光-III”主机装置自适应光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of the adaptive optics system of Shen Guang facility

39个驱动单元呈正六边形分布在变形镜上,图中边缘处由内向外的三条分界线依次为320 mm×320 mm、340 mm×340 mm和360 mm×360 mm,对应于变形镜设计校正口径、最大校正口径和最大通光口径。图3为对 $\pm 4 \mu\text{m}$ 前10阶和 $\pm 1 \mu\text{m}$ 第11至15阶Zernike像差的校正残差,均满足校正残差PV小于 $1 \mu\text{m}$ 和RMS小于 $0.2 \mu\text{m}$ 的系统需求。

2.2 变形反射镜

变形镜依据哈特曼传感器提供的波前数据,在软件系统的控制和电气系统的驱动下产生系统所需要的面形,实现对装置中波前畸变的校正。“神光-III”主机装置中波前校正系统的布局变形镜位于腔镜位置处,变形镜的实际最大通光口径为370 mm×370 mm,变形镜采用了39个驱动单元,呈正六边形分布于镜面上,驱动器间距为70 mm,变形量不小于 $\pm 5 \mu\text{m}$,采用可

拆卸驱动器的技术提高生产效率、并增进可维护性,采用轻量化技术减少整个变形镜重量和体积。

图4和图5分别是整个“神光-III”主机装置的全部50套变形镜(备件2套)的初始面形(PV\RMS)和驱动器行程的统计图。其中图4初始面形PV平均值 $0.67 \mu\text{m}$,最大值 $0.9 \mu\text{m}$,最小值 $0.47 \mu\text{m}$,RMS平均值 $0.11 \mu\text{m}$,最小值 $0.07 \mu\text{m}$,最大值 $0.17 \mu\text{m}$;图5驱动器行程(PV)平均 $5.8 \mu\text{m}$,最大值 $6.9 \mu\text{m}$,最小值 $5.2 \mu\text{m}$ 。

变形镜的PZT驱动器,在施加电压后,会有随时间的微量变形,影响校正效果。图6持续加电时间1 h面形RMS变化的平均值 $0.13 \mu\text{m}$,最大值 $0.19 \mu\text{m}$,最小值 $0.05 \mu\text{m}$,对校正效果影响不大。

2.3 哈特曼传感器

哈特曼传感器组件用于获取主放大系统的波前畸变,它由哈特曼传感器、电动衰减盘和四维自动对准

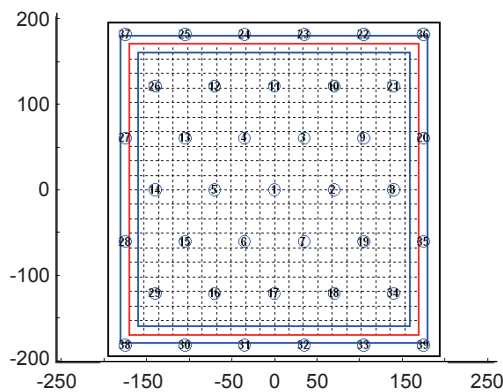


图2 变形镜和哈特曼传感器布局

Fig. 2 Layout of the deformable mirror and the Shack-Hartmann wavefront sensor

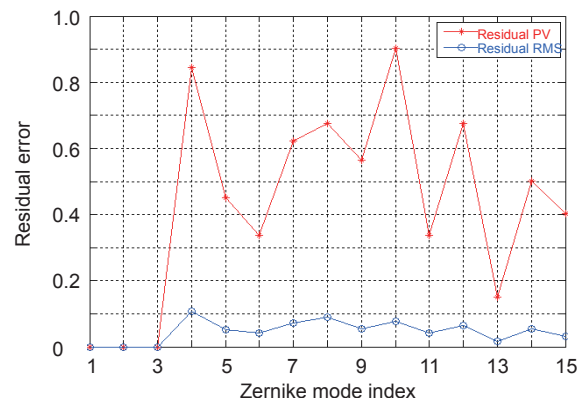


图3 变形镜拟合能力分析

Fig. 3 Analysis of the fitting ability of the deformable mirror

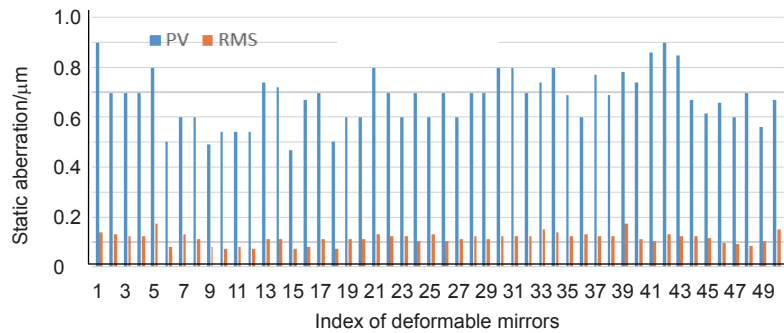


图4 变形镜初始面形

Fig. 4 Static aberrations of the deformable mirrors

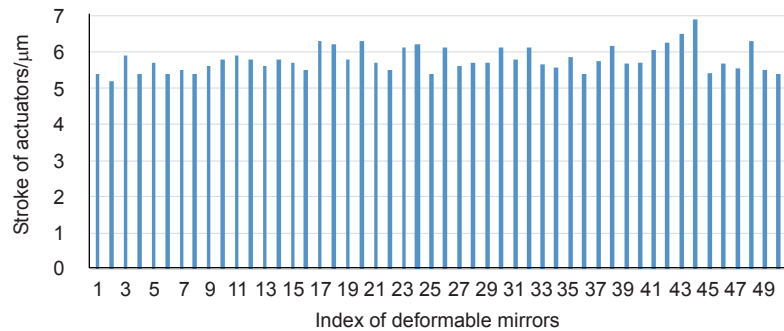


图5 变形镜行程

Fig. 5 Stroke of the deformable mirrors

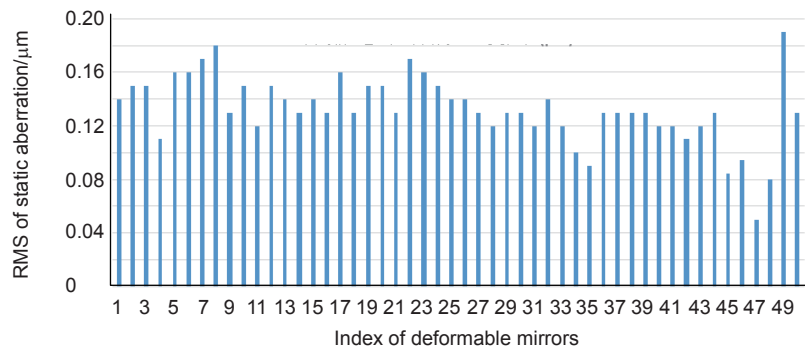


图6 变形镜持续加电1 h 镜面面形变化

Fig. 6 The change of the static aberration of the deformable mirror 1 hour after adding voltages

模块组成。电动衰减盘把输入光能量衰减至哈特曼传感器所需要的正常工作范围；四维自动对准模块根据哈特曼传感器反馈的传感器与变形镜的对准状态数据，在波前校正系统需要的情况下，由软件控制自动完成对哈特曼传感器的四个自由度的调整(即沿 X、Y 轴方向的平移和偏转)，实现哈特曼传感器和变形镜的自动对准，并保证系统的使用的方便性与灵活性。哈特曼传感器的最大通光口径为 6 mm×6 mm，在全口径上采样阵列可用的最大子孔径数为 24×24。哈特曼传感器的动态范围大于 16 μm，其测量精度(RMS)高于 0.1 μm。

图 7 和图 8 分别是整个“神光-III”主机装置的全部 50 套哈特曼波前传感器(包括备件 2 套)的测量精度(RMS)和测量动态范围(PV)的统计图。其中图 7 测量精度(RMS)平均值 0.02 μm，最大值 0.05 μm，最小值 0.005 μm；图 8 测量动态范围(PV)平均值 21.7 μm，最大值 24 μm，最小值 20.3 μm。

3 波前控制系统方案

“神光-III”主机装置主放大系统，采用“腔内四程+助推三程”的多程放大技术方案。波前校正系统通过对激光的静态波前和动态波前的校正，确保激光在主放

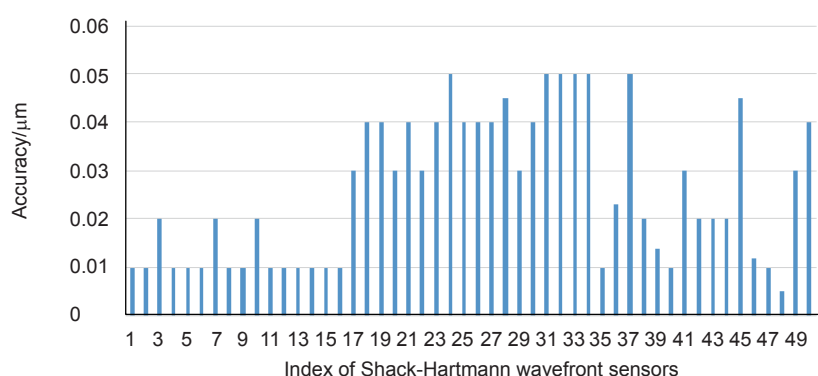


图7 哈特曼测量精度

Fig. 7 Accuracy of the Shack-Hartmann wavefront sensors

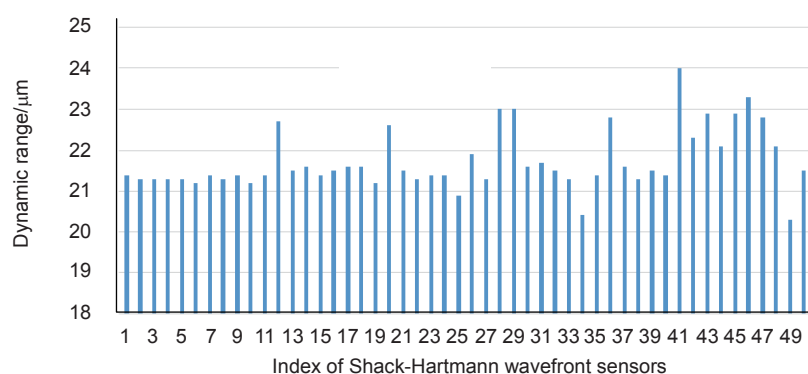


图8 哈特曼测量动态范围

Fig. 8 Dynamic range of the Shack-Hartmann wavefront sensors

大系统内的传输顺畅,改善主放大系统输出光束质量,同时缩短装置的发射周期,提高装置的运行效率。

每一束激光在腔镜位置配置一套变形镜、在主放测量包内配置一套哈特曼传感器构成一套波前校正系统。

在系统控制方面,采用客户/服务器基本架构,并将电气控制组件和控制管理软件分层管理实现与装置的硬件对接以及软件对接集成。系统中变形镜组件、波前传感器组件和电气组件全部网络化,整个波前校正系统可单路波前校正、分束组波前校正或任意自由组合的波前校正。既能实现本地控制,也能远程集中控制。

ICF 系统中需要校正的波前误差除了各级放大系统的静态误差,还有出光脉冲瞬间的热效应引起的动态误差,这种误差不可能实时闭环校正,但其大小与主激光的输出能量相关。波前校正系统采用双程波前闭环校正的控制模式,首先以标定光源作为信标光,对主放大器的双程静态波前畸变进行测量和闭环校正,记录静态闭环控制电压;其次利用哈特曼波前传

感器测量主激光在不同能量输出时的动态波前,分析动态波前数据并借助变形镜传递函数离线拟合得到动态波前开环控制电压;最后叠加开环控制电压和静态闭环电压实现对装置的动态、静态波前校正。

图9显示了“神光-III”主机装置上典型的波前。

统计上看,装置上典型的综合波前水平在 5λ 附近;进一步分析表明,波前畸变的像差构成中,除了离焦之外,主要表现为口径边角处较为明显的波前变化,以像散为主要特征。图10显示了A1束组8束激光波前的像差构成。由图可知,“神光-III”主机装置中的波前像差主要分布在4阶 Zernike 像差(前15项)以内,除了第4项(离焦)外,第5、6项(像散)占据了主要部分,其余主要分布在彗差上。

4 系统校正典型结果

自适应光学校正前后,“神光-III”主机装置上典型的波前及其远场光斑分布见图11。计算结果表明,通过校正,像差均得到有效的校正,满足系统的能量集中度要求(95%@10DL)。

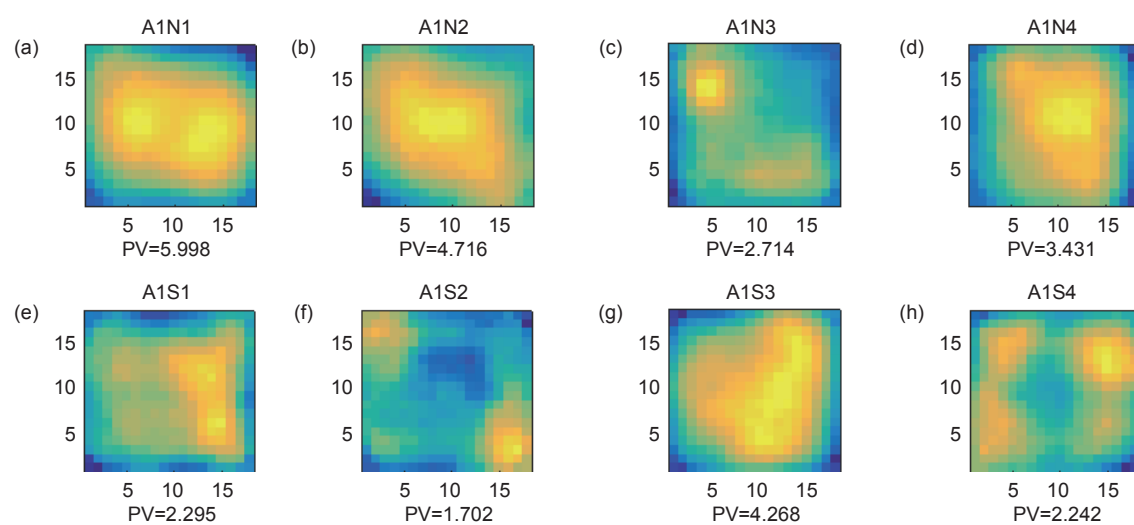


图 9 部分“神光-III”主机装置输出光束波前
Fig. 9 Samples of the wavefront of the Shen Guang facility

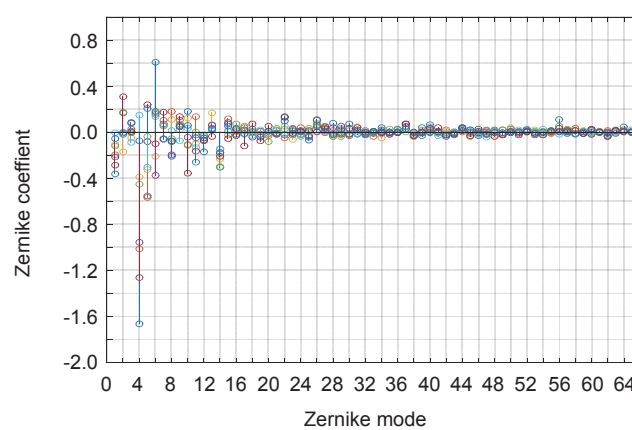
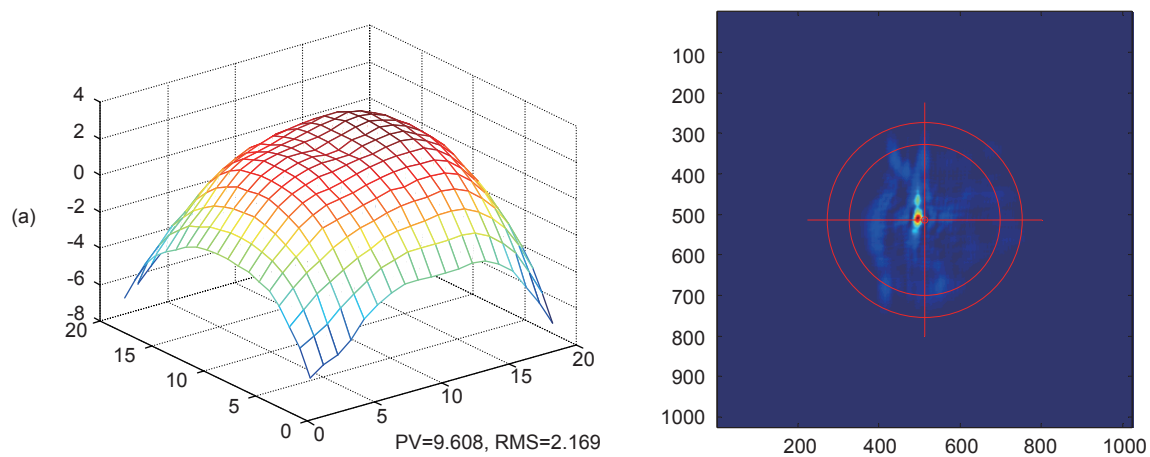


图 10 “神光-III”主机装置 A1 束组 8 束激光波前像差模式分解
Fig. 10 Zernike mode decomposition of the laser beams in A1 of the Shen Guang facility



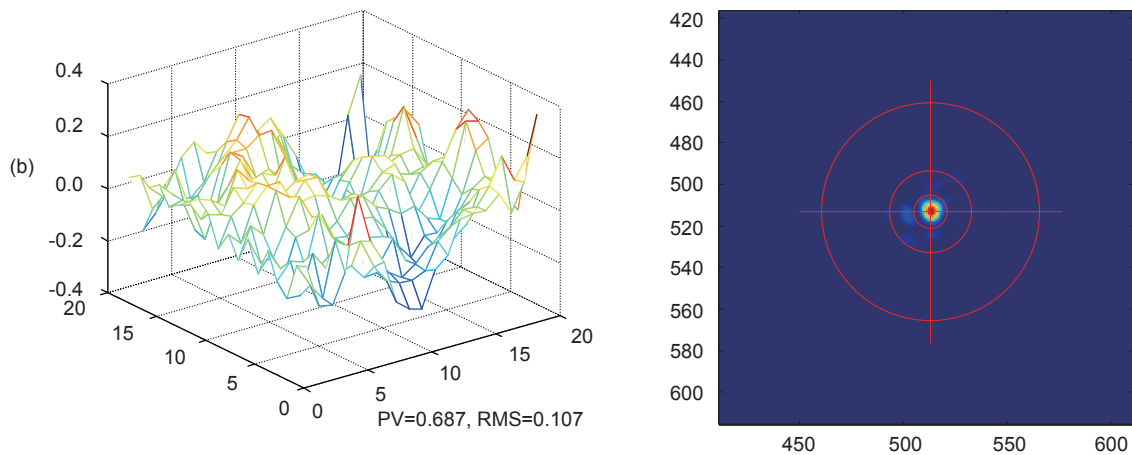


图 11 “神光-III”主机装置校正前后的波前及其远场光斑。(a) 开环: PV=9.6 μm , RMS=2.27 μm , beta(95%): 30.1, beta(DL): 23.2; (b) 闭环: PV=0.7 μm , RMS=0.11 μm , beta(95%): 6.6, beta(DL): 2.5

Fig. 11 Wavefront and far-field spots of the Shen Guang facility before and after correction. (a) Open-loop : PV=9.6 μm , RMS=2.27 μm , beta(95%): 30.1, beta(DL): 23.2; (b) Close-loop : PV=0.7 μm , RMS=0.11 μm , beta(95%): 6.6, beta(DL): 2.5

5 结 论

本文介绍了为“神光-III”主机装置研制的五十套工程化自适应光学系统,包括基于可拆卸技术的通光口径大于 370 mm×370 mm、初始面形(PV)小于 0.9 μm 、驱动器行程(PV)大于 $\pm 5.8 \mu\text{m}$ 以及持续加电时间 1 h 面形 RMS 变化小于 0.13 μm 的大口径变形镜和具有自动对准功能的测量精度(RMS)优于 0.02 μm 、测量动态范围(PV)大于 21.7 μm 哈特曼波前传感器。

采用双程波前闭环校正的控制模式实现全装置的像差校正,结果表明自适应光学系统改善了主放大系统输出光束质量(95%@10DL),确保“神光-III”主机装置激光在主放大系统内的传输顺畅。

致 谢

感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心胡东霞研究员、代万俊副研、王德恩副研、薛桥助研等同志在项目实施过程中提供的支持与密切配合。

参考文献

- [1] Sacks R A, Auerbach J M, Bliss E S, *et al.* Application of adaptive optics for controlling the NIF laser performance and spot size[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3492**: 344–354.
- [2] Zacharias R A, Bliss E S, Feldman M, *et al.* National Ignition Facility (NIF) wavefront control system[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3492**: 678–692.
- [3] Hartley R, Kartz M W, Behrendt W C, *et al.* Wavefront correction for static and dynamic aberrations to within 1 second of the system shot in the NIF Beamlet demonstration facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, **3047**: 294–300.
- [4] Zuegel J D, Borneis S, Barty C, *et al.* Laser challenges for fast ignition[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, **49**(3): 453–482.
- [5] Jiang A W, Huang S F, Ling N, *et al.* Hill-climbing wavefront correction system for large laser engineering[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, **965**: 266–272.
- [6] Jiang W H, Zhang Y D, Xian H, *et al.* A wavefront correction system for inertial confinement fusion[C]//*Proceedings of the 2nd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*, 1999: 8–15.
- [7] Zhang Y D, Yang Z P, Duan H F, *et al.* Characteristics of wavefront aberration in the single beam principle prototype of the next-generation ICF system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4825**: 249–256.
- [8] Zhang Y, Yang Z, Guan C, *et al.* Dynamic aberrations correction in an ICF laser system[C]//*Proceedings of the 4th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*, 2005, **102**: 261–271.
- [9] Yang Z P, Li E D, Wang H Y, *et al.* Adaptive optical system for a large-aperture Nd: glass laser for ICF[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5639**: 21–27.
- [10] Yang H Z, Li X Y, Jiang W H. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1): 11–16.
- [11] Vorontsov M A, Carhart G W, Cohen M, *et al.* Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, **17**(8): 1440–1453.
- [12] 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.

杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1): 11–16.

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.

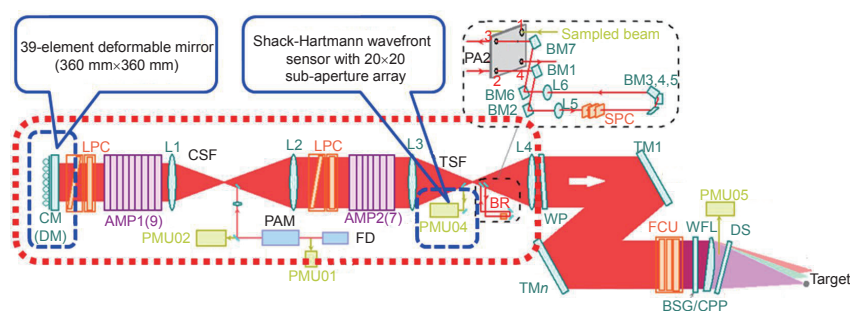
Adaptive optics correction systems on Shen Guang III facility

Yang Zeping^{1,2,3*}, Li Ende^{1,2*}, Zhang Xiaojun^{1,2}, Fan Muwen^{1,2},
Shi Ningping^{1,2}, Wei Ling^{1,2}, Long Guoyun^{1,2}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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



Schema of the adaptive optics system of Sheng Guang III facility

Overview: The aberration in the inertial confinement fusion (ICF) system degrades the quality of high-power laser beam, bringing about problems such as decreasing of the laser focusing characteristic, blocking the plasma hole and decreasing of efficiency of the frequency tripling. The adaptive optics (AO) has been proved to be the key approach to solve the aberration problem in ICF, with its successful applications in the National Ignition Facility (NIF), OMEGA EP and Shen Guang I facility. This paper reports the fifty suites of engineered-manufacture adaptive optics systems developed for the Shen Guang III (SGIII) facility.

The system structure of SGIII is briefly described first. Each AO system of SGIII consists of a high-accuracy-controllability and high-damage-threshold large aperture reflective dismountable deformable mirror and a Shack-Hartmann wavefront sensor. The deformable mirror is composed of 39 PZT actuators with dynamic range of $\pm 5 \mu\text{m}$. Its maximum and working apertures are $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ and $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$, respectively. The Shack-Hartmann wavefront sensor uses a micro-lens array of 22×22 with 484 efficient sub-apertures in the $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ square aperture. Its dynamic range is more than $15 \mu\text{m}$ and its accuracy (RMS) is higher than $0.1 \mu\text{m}$.

The deformable mirror is designed to meet the system requirement that PV and RMS of the residual wavefront are less than $1 \mu\text{m}$ and $0.2 \mu\text{m}$, respectively, for the correction of the aberration of Zernike mode ($\pm 4 \mu\text{m}@1-10$, $\pm 1 \mu\text{m}@11-15$). PV and RMS of the original surface and the dynamic range of the 50 suites of deformable mirrors are tested. The micro-deformation of the actuators after charging is also investigated.

The Shack-Hartmann wavefront sensor module consists of a Shack-Hartmann wavefront sensor, an electrical attenuator and a four-axis auto-align adjusting rack. The electrical attenuator adjusts the power of the incident laser beam to the working range of the Shack-Hartmann wavefront sensor. The four-axis auto-align adjusting rack aligns the Shack-Hartmann wavefront sensor to the incident laser beam. The dynamic range and the accuracy of the 50 suites of Shack-Hartmann wavefront sensor are tested.

In the end, the AO control scheme is also described in detail. All the sub-modules, including the deformable mirrors, Shack-Hartmann wavefront sensors and electrical switches, are connected and controlled via network. The C/S architecture is utilized and the control software can be deployed and run both locally and remotely. The characteristic of the static and dynamic aberration is analyzed and the correction strategy is illustrated. The result of system correction shows that the adaptive optics systems improved the beam quantity of the SGIII facility, meet the requirement that the laser beam energy is higher than 95% in the 10 time diffraction limit zone, and ensured the laser transmission in the main amplification system of the SGIII facility.

Citation: Yang Z P, Li E D, Zhang X J, *et al.* Adaptive optics correction systems on Shen Guang III facility[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 180049

* E-mail: liende@ioe.ac.cn