

文章编号: 0258-7025(2009)07-1625-10

# 自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展

姜文汉<sup>1,2</sup> 杨泽平<sup>1,2</sup> 官春林<sup>1,2</sup> 张小军<sup>1,2</sup> 饶长辉<sup>1,2</sup> 张雨东<sup>1,2</sup>

李思德<sup>1,2</sup> 许 鸿<sup>1,2</sup> 黄林海<sup>1,2,3</sup> 凡木文<sup>1,2</sup> 施宁平<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)  
<sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 在惯性约束聚变(ICF)领域,采用自适应光学(AO)技术进行波前控制是解决 ICF 激光系统中光束质量问题的重要手段。报道了“神光 III”原型装置中 8 套工程化自适应光学系统、未来 ICF 系统发展所需的大口径可拆卸变形镜(DM)样镜研制以及 ICF 自适应光学波前控制技术的最新研究进展。8 套工程化自适应光学系统在“神光 III”原型装置上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,验证了校正对打靶时 X 射线分布的改善效果。所研制的 17 单元大口径可拆卸变形镜的口径为 284 mm×284 mm,行程大于±6 μm,谐振频率大于 500 Hz。在 ICF 自适应光学波前控制技术中,采用了基于哈特曼传感器近场相位测量的控制方法和基于靶室远场的随机并行梯度下降(SPGD)控制方法均能取得良好的校正性能。

**关键词** 自适应光学;惯性约束聚变;可拆卸变形镜;波前控制算法

**中图分类号** TN248.1;TL632+.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1625

## New Progress on Adaptive Optics in Inertial Confinement Fusion Facility

Jiang Wenhan<sup>1,2</sup> Yang Zeping<sup>1,2</sup> Guan Chunlin<sup>1,2</sup> Zhang Xiaojun<sup>1,2</sup>

Rao Changhui<sup>1,2</sup> Zhang Yudong<sup>1,2</sup> Li Ende<sup>1,2</sup> Xu Hong<sup>1,2</sup> Huang Linhai<sup>1,2,3</sup>

Fan Muwen<sup>1,2</sup> Shi Ningping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610209, China

<sup>2</sup> The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu Sichuan 610209, China

<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Adaptive optical wavefront control technique is an important means to improve the beam quality in the inertial confinement fusion (ICF) laser system. The new progress on adaptive optics (AO) in ICF facility, including the 8 sets of AO systems for the “Shenguang III” prototype facility, the development of the large aperture deformable mirror (DM) prototype with the replaceable actuators used in the future ICF systems, and the AO wavefront control technologies, are introduced. In the “Shenguang III” prototype facility, the static aberrations of the entire optical system from the front-end to the target using the 8 sets of AO systems are successfully corrected and the focal spot intensity distributions in the target are improved. The improvement of the X-ray distributions after AO correction is observed. A large aperture DM prototype with 17 replaceable actuators, 284 mm×284 mm aperture size, more than ±6 μm stroke and 500 Hz resonant frequency is manufactured and tested. The stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm based on the far-field focal spot intensity is tested and proven to be effective for the ICF facility.

**Key words** adaptive optics; inertial confinement fusion; deformable mirror; wavefront control algorithm

## 1 引言

在惯性约束聚变(ICF)大规模高功率固体激光装置中,有很多因素导致系统输出的激光光束质量

下降,其中既有静态的波前畸变,也有动态相位变化。用作 ICF 驱动器的激光系统中都存在大量大口径光学元件,静态波前畸变主要来源于光学元件

收稿日期: 2009-03-02; 收到修改稿日期: 2009-03-30

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804304)资助课题。

作者简介: 姜文汉(1936—),男,中国工程院院士,研究员,博士生导师,主要从事光电工程方面的研究。

E-mail: adopse@ioe.ac.cn

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性变化等;动态波前畸变是与激光系统的工作过程和工作参数有关的,它主要来源于激光抽运过程中产生的元件热变形,同时也包括由工作环境所带来的畸变。激光光束质量的下降给 ICF 激光系统带来的影响不仅仅在于光束聚焦特性下降;由于光束聚焦时焦斑上的能量发散,进而还将导致系统工作过程中的等离子体堵孔问题;较大的像差还可能进一步带来系统三倍频系统的效率下降。随着激光装置规模的逐步升级,光束质量问题也将表现得更为突出。

提高大口径光学元件加工能力和光学系统装校技术水平是改善 ICF 激光系统光束质量的基本方法。然而,受限于现有的工艺水平,在短时间内通过这一方法显然难以满足 ICF 系统对光束质量的要求;同时,系统中的动态波前畸变是难以通过光学加工手段来消除的。因此,采用自适应光学(AO)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)<sup>[1,2]</sup>中,采用了一块 400 mm×400 mm 的大口径变形镜(DM)来控制光束质量;在 OMEGA EP<sup>[3,4]</sup>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 X II<sup>[5]</sup>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。

在国内,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 单元变形镜并采用了远场焦斑优化控制技术(爬山法)的自适应光学系统<sup>[6]</sup>,将激光器输出光束远场峰值能量提高了 3 倍;从 1999 年开始,又开始为“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<sup>[7]</sup>。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  $\lambda$  校正到了 2.87  $\lambda$ ,实现了超过 10  $\lambda$  的波前校正<sup>[8~10]</sup>;在随后建立的“神光 III”原型装置的第一路上,实现了对激光器主放大系统中动态波前的校正,将主激光动态发射时的远场焦斑峰值能量提高了 3 倍。

随着 8 路“神光 III”原型装置的建成,为了实现系统的光束质量指标,2007 年本课题组为该系统建立了 8

路高度工程化的自适应光学系统,并集成到激光系统中,对主放大系统输出光束的静态和动态波前进行控制。2008 年,又对该自适应光学系统进行了升级,将波前校正范围延伸到了靶点。8 套工程化自适应光学系统在“神光 III”原型装置上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。

随着我国 ICF 领域技术的不断发展,对自适应光学系统的要求也不断提高,其中最为关键的技术就是大口径变形镜的高可靠性批量化生产。为适应未来 ICF 系统发展的需要,还对可批量化生产的大口径可拆卸变形镜进行了技术攻关,并且已经取得了显著进展。

在 ICF 自适应光学波前控制技术中,通常采用基于哈特曼传感器近场相位测量的控制方法。为适应未来 ICF 波前控制技术发展需要,还开展了基于靶室远场的随机并行梯度下降(SPGD)控制方法,并已取得了良好的室内初步实验结果。

本文对“神光 III”原型装置中 8 套工程化自适应光学系统、未来 ICF 系统发展所需的大口径可拆卸变形镜样镜研制以及 ICF 自适应光学波前控制技术的最新研究进展进行了详细报道。

## 2 “神光 III”原型装置中 8 套工程化自适应光学系统最新研究进展

### 2.1 系统结构

“神光 III”原型装置由 8 束激光构成,8 路自适应光学系统作为激光器的一部分嵌入到系统中,作为整个激光装置的一部分参与系统运行。整个自适应光学系统由 8 块变形反射镜及高压放大系统、8 套闭环哈特曼波前传感器、一套测量哈特曼传感器、衰减系统以及基于网络的远程和本地控制系统等组成。图 1 显示了单路自适应光学系统的结构。每路自适应光学系统包括各自独立的变形镜、闭环传感器(哈特曼传感器 I)和控制系统,每路自适应光学系统既可以独立运行,又可以由远程控制系统根据装置上实验的需要统一调度运行。所有 8 路自适应光学系统共用一台位于靶场的测量传感器(哈特曼传感器 II)。

每一路激光系统由前端及预放级、注入光学系统、主放大系统、光束取样及缩束系统、光束传输变换及靶场光学系统组成。根据原型装置最初的设计目标,自适应光学系统主要用来校正主放大系统输出端之前的系统中的像差,以满足系统对光束质量的要求。随着对原型装置上像差分布规律认识的深

入,研究表明仅仅校正主放大系统的像差对系统来说是远远不够的。由于靶场光学系统中还有大量大口径光学元件,也是重要的波前畸变来源,因此将校正范围延伸到靶场是十分必要的。

根据“神光Ⅲ”原型装置靶场系统的特殊结构以及靶场光学系统相对稳定的特点,自适应光学系统

中采用了一套锥光入射的哈特曼传感器(图 1,哈特曼传感器 II)在靶场对所有 8 路激光系统的静态像差进行测量,然后将测量数据通过特定的算法传递给每一路自适应光学系统的闭环波前传感器(图 1,哈特曼传感器 I),从而实现对全系统像差的校正。

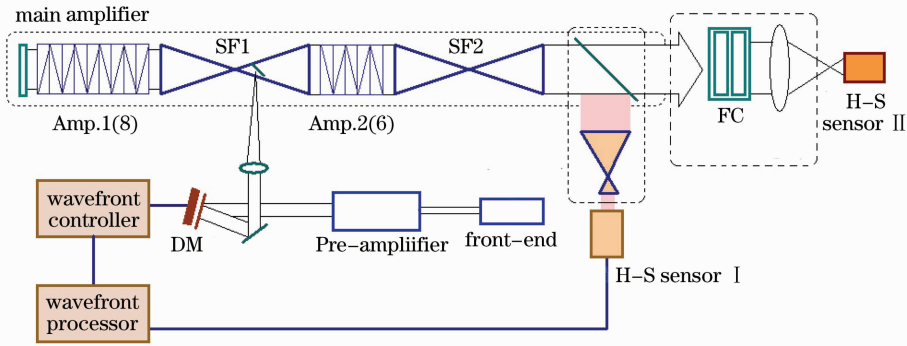


图 1 “神光Ⅲ”原型装置单路自适应光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of adaptive optical system for the “Shenguang-III” prototype facility

### 2.2 变形镜及哈特曼传感器系统

“神光Ⅲ”原型装置自适应光学系统中采用了 8 套高精度面形、高损伤阈值变形反射镜。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 45 个基于 PZT 的驱动器,驱动器有效工作行程为  $\pm 4 \lambda$ ,极限工作行程为  $\pm 5 \lambda$ ,根据对原型装置波前特性的研究, $\pm 4 \lambda$  的行程足以满足系统对像差校正能力的需要。哈特曼传感器 I 包括了  $22 \times 22$  的微透镜阵列,有效子孔径数为 484 个,动态范围为不小于  $\pm 5 \lambda$ 。哈特曼传感器 I 的参数设计既可以满足波前控制系统的要求,又能满足装置上对波前特性研究时较高空间采样率的需要。位于靶场的共用哈特曼传感器 II 包括  $20 \times 20$  的微透镜阵列。



图 3 部分用于“神光Ⅲ”原型装置的变形反射镜

Fig. 3 Some deformable mirrors for the “Shenguang-III” prototype facility

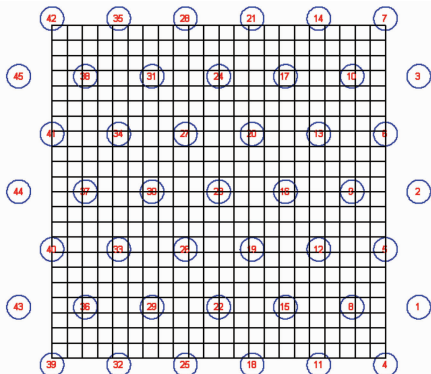


图 2 变形镜和哈特曼传感器布局

Fig. 2 Configuration of the actuators of the deformable mirror and the subapertures of H-S sensor

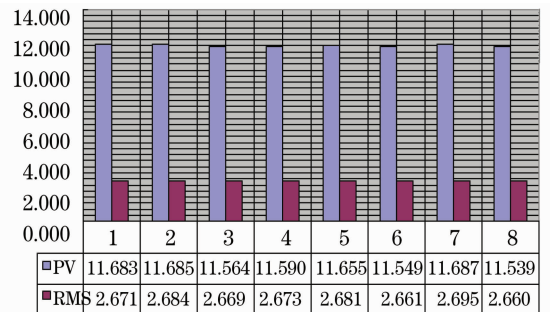


图 4 用于闭环控制的 8 套哈特曼传感器比对测试

Fig. 4 Comparative test for the 8 Hartmann sensors used for close loop operation

镜。其有效通光口径为  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ,最大通光口径为  $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。经过干涉仪测试,每块变形镜的静态面形精度均方根(RMS)都不超过  $0.03 \lambda$ ;在  $1 \text{ ns}$  脉冲光下,变形镜膜系损伤阈值不小于  $5 \text{ J/cm}^2$ 。通过采用成都光电所独特的低温膜系技

图 3 为用于“神光Ⅲ”原型装置的部分变形反射

术,实现对变形镜整体组装后高损伤阈值的高反射膜的镀制。这些变形镜在满足原型装置对膜系高损伤阈值要求的同时,又实现了高精度的镜面面形。

用于闭环控制的 8 套哈特曼传感器不仅设计参数完全一致,在精密装校后经过比对测试,传感器之间的差异在系统的  $\lambda/10$  测量精度要求下完全可以忽略,从而满足了原型装置对传感器一致性、互换性的要求。图 4 显示了 8 套哈特曼传感器对同一像差进行测量的结果。

### 2.3 波前控制系统方案

在“神光 III”原型装置自适应光学波前校正系统的早期设计中,自适应光学系统只用于校正主放大系统的像差,因此,在图 1 中,最初的系统设计没有包括哈特曼传感器 II。然而在随着对原型装置波前校正技术研究的深入,注意到校正了主放大系统的像差后,靶场焦斑并没有明显的改善,这是由于主放大器以后的光学系统仍然存在着较大的像差,因此,

进行全系统的像差校正是十分必要的,所以,在靶场引入了第二套哈特曼传感器,用于对全系统的像差进行测量,同时也可以直接用于对单束激光的全系统像差的闭环校正。

在图 1 中,全系统静态像差由前端及注入光学系统、主放大系统、传输变换及靶场光学系统的像差组成;对哈特曼传感器 I 还包括取样光学系统的像差。动态像差主要来自主放大系统中由于氙灯抽运带来的热畸变。主激光发射时产生的动态波前畸变由哈特曼传感器 I 测量,全系统静态像差由哈特曼传感器 II 测量。

图 5 为位于靶点的哈特曼传感器 II 测量到的全部 8 束激光的静态波前。从测量结果来看,系统静态像差在  $2.9\lambda$  到  $5.9\lambda$  之间,从空间分布上看,像差仍然以像散为主要特征。从 2.4 节的分析可以看出,对这样大小的像差,通过校正完全能满足对光束质量的要求。

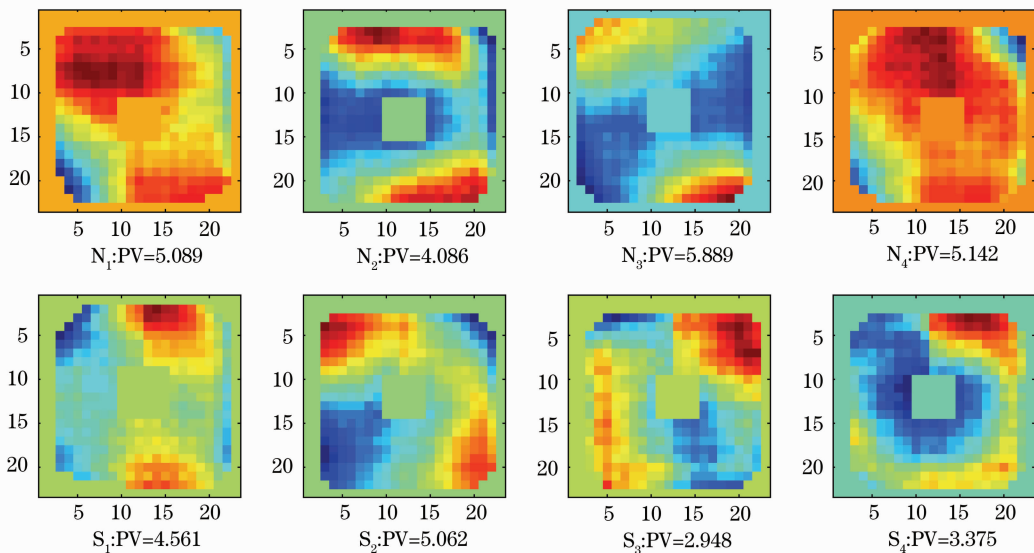


图 5 由靶点哈特曼传感器测量到的 8 束激光全系统静态波前

Fig. 5 Static wavefront for all the 8 lasers measured by H-S sensors at targets

由于 8 路自适应光学系统在靶场共用一台测量传感器,而闭环校正要由各路系统自身的控制波前传感器来完成,因此需要将传感器 II 测量到的数据传递给传感器 I。传感器之间的数据传递基于如下原理:即无论用哪个传感器来进行闭环校正,在变形镜上对应的镜面面形是完全相同的。基于这一原理,采用闭环传感器和测量传感器对变形镜的响应来完成数据转换。首先,在系统中获取两个波前传感器对变形镜的响应矩阵  $\mathbf{H}_1$  和  $\mathbf{H}_2$ ,对于同一个波前,变形镜上所需的驱动电压系列  $\mathbf{v}$  是完全一致的,从而有  $\mathbf{s}_1 = \mathbf{H}_1 \mathbf{v}$  和  $\mathbf{s}_2 = \mathbf{H}_2 \mathbf{v}$ ,其中,  $\mathbf{s}_1$  和  $\mathbf{s}_2$  分别为同

样的电压系列  $\mathbf{v}$  控制下,由哈特曼传感器 I 和哈特曼传感器 II 测量到的变形镜面形数据。于是得到了由哈特曼传感器 II 测量到的  $\mathbf{s}_2$  在传感器 I 上的映射  $\mathbf{s}_1: \mathbf{s}_1 = \mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2^+ \mathbf{s}_2$ 。上述算法的实现既可以通过软件算法来完成,又可以在系统上利用变形镜的响应来直接完成。

通过上述过程,将在靶点测量到的全系统像差(图 5)交由哈特曼传感器 I 来完成闭环校正。在“神光 III”原型装置中,根据工程装置的特点,系统整体光路是相对稳定的,只要靶场光学系统不发生重调整或者变化,其像差将保持相对稳定,从而不需

要在采用传感器 I 闭环的过程中实时测量系统像差,而一旦系统出现大的变化(比如更换光学元件、系统大规模调整等),或者校正结果表明效果明显下降,则可以重新对系统静态像差进行测量,并更新这些数据即可。由于系统对主放大系统之前的像差是闭环校正的,即使这一部分光路发生了变化,其变化

将被实时控制,不影响系统的校正结果。

### 2.4 全系统静态波前校正实验结果

基于 2.3 节的校正原理,对原型装置上所有 8 束激光的静态波前进行了校正。图 6 为对北 2 路校正的结果。计算结果表明,通过校正,70% 能量范围缩小了一半,焦斑形态显著改善。

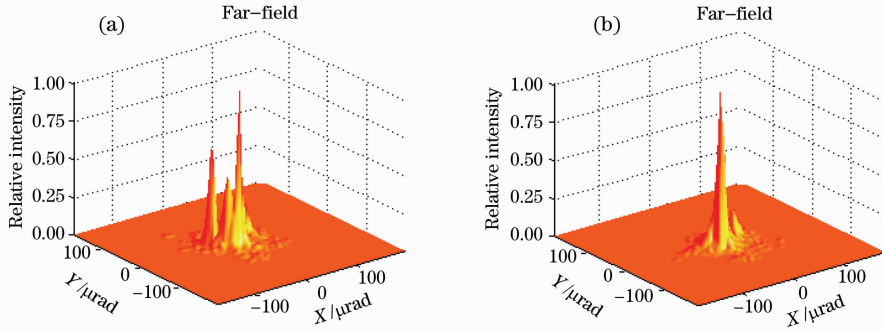


图 6 原型装置北 2 路校正前(a)后(b)的远场光斑

Fig. 6 Open (a) and close-looped (b) focal spot for north II laser beam of “Shanguang III” prototype

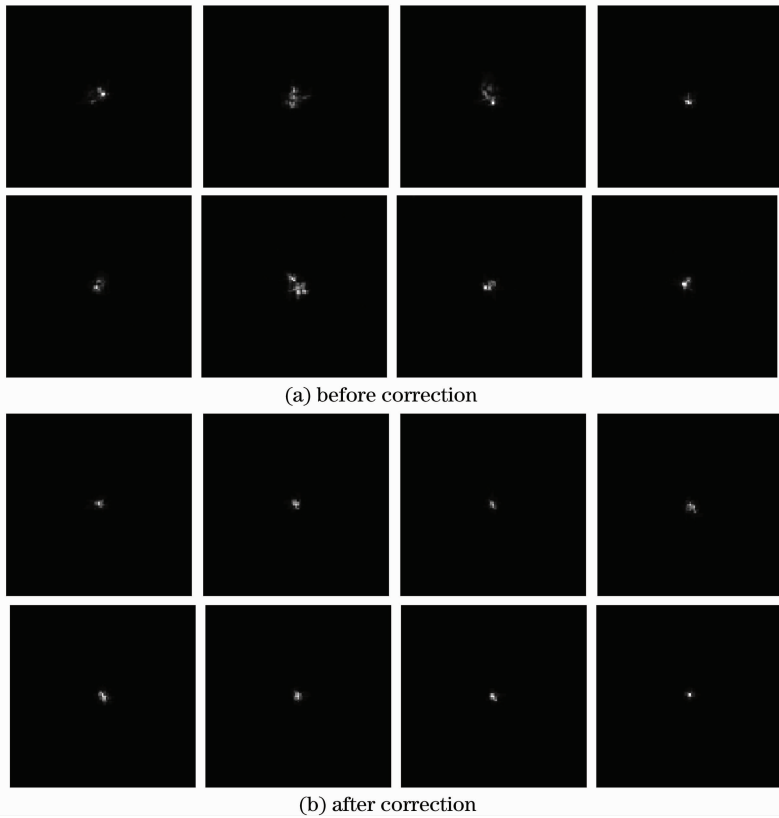


图 7 “神光 III”原型装置南北 8 路校正前后的远场光斑

Fig. 7 Open loop and closed-loop focal spots for 8 laser beams of “Shenguang-III” ICF prototype

自适应光学校正前后,“神光 III”原型装置上 8 路远场光斑分布如图 7 所示。计算结果表明,通过校正,所有各路像差均得到有效的校正,提高了穿孔透过率。

我们还利用 8 路工程化自适应光学系统进行 ICF 装置的激光物理打靶实验。在本次校正实验中,在“神光 III”原型装置上首次验证了校正对打平面靶时 X 射线分布的改善效果。打靶实验结果表明,采用自适应光学技术可以使靶上 X 射线的分布得到很大改善,从而提高整个 ICF 系统的效能。

我们还利用 8 路工程化自适应光学系统进行

### 3 大口径可拆卸变形镜研究进展

随着我国 ICF 领域技术的不断发展,对自适应光学系统的要求也不断提高,其中最为关键的技术就是大口径变形镜的高可靠性批量化生产。为适应未来 ICF 系统发展的需要,我们对可批量化生产的大口径可拆卸变形镜进行了技术攻关,并取得了显著进展。

在美国国家点火装置 NIF 中,采用了劳伦斯利弗莫尔实验室专门研制的  $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$  大口径变形反射镜进行波前控制。在解决这种大口径变形反射镜的研制效率和可维护性问题等方面,美国利弗莫尔实验室已展示了他们在这方面的一些研究成果。与 ICF 原型装置所采用的变形反射镜相比,我国未来 ICF 领域发展所需的大口径变形反射镜存在以下特点和难点:

1)随着变形反射镜口径的增加,变形反射镜结构设计、研制工艺会变得相当复杂,比如因极间距、变形量的增加,给变形反射镜影响函数设计带来困难;

2)随着变形反射镜口径的增加,变形反射镜薄镜面(展弦比达 40)的光学加工难度大大增加,同时也对变形反射镜目前所采用的整体镀膜方式提出了挑战;

3)点火工程所使用的大口径变形反射镜具有批量化特征,数量通常达百块以上,要求变形反射镜这一特殊工艺的器件必须能够进行批量化生产,且在使用中能够方便维护。

基于上述特点和难点,提出了一种可拆卸大口径变形反射镜的技术实现方案,并且研制了一块 17 单元可拆卸大口径变形反射镜样镜。

#### 3.1 可拆卸大口径变形镜结构设计

图 8 为常用的分立式压电变形镜连接示意图,由镜面 1,压电驱动器 2,基座 3 三个基本部分组成,压电驱动器按一定布局分布在刚性基座上,连续薄镜面与驱动器阵列粘接,当驱动器沿轴向伸缩时,带动薄镜面产生形变。这种结构的变形镜性能稳定、

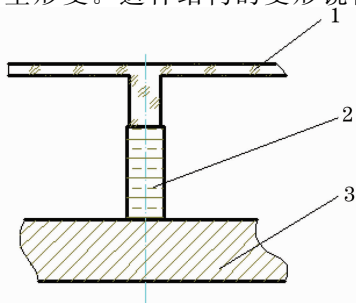


图 8 常用分离式压电变形镜连接示意图

Fig. 8 Conventional connection of actuator and mirror

结构紧凑,但工艺技术复杂、镀膜难度大、制造周期长、可维护性差,较适用于口径相对较小、单元数密度大的变形反射镜。图 9 为我们提出的一种可拆卸大口径变形反射镜连接示意图,包含有镜面 1,弹性片 2,底座 3,压电驱动器 4 和精密螺纹调节件 5。该结构特点有:弹性片与镜面进行无应力粘结,弹性片与压电驱动器之间不连接但有预紧力,压电驱动器就可以更换,变形反射镜维护容易,预紧力能实现镜面的负变形,同时,受弹性片预紧力的压电驱动器,可实现  $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$  以上变形,从而提高了大口径变形反射镜的变形量;精密螺纹调节件与驱动器粘结为一体,通过螺纹调节,可以实现大口径变形反射镜原始面形的波长级精度调节。该结构非常适用于激光核聚变装置中的大口径变形反射镜。

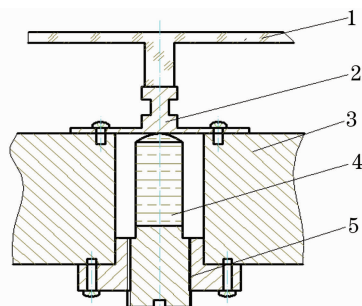


图 9 可拆卸压电变形镜连接示意图

Fig. 9 OM with replaceable actuator

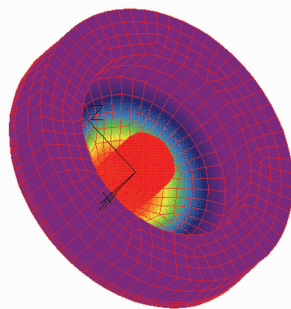


图 10 弹性片刚度有限元分析 ( $3.7\text{ kg}/\mu\text{m}$ )

Fig. 10 FEM analysis for elasticity lamella stiffness

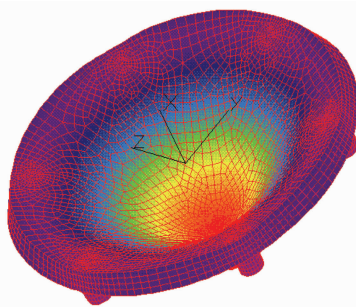


图 11 镜面刚度有限元分析 ( $3.0\text{ kg}/\mu\text{m}$ )

Fig. 11 FEM analysis for mirror stiffness

在变形镜样镜结构设计中,主要解决镜面刚度、弹性片刚度、变形镜影响函数的参数设计问题,这些参数都通过有限元分析得到。

图 10 为弹性片刚度分析,图 11 为镜面刚度分析,要求弹性片刚度必须大于镜面刚度,图 12 是对变形反射镜整体结构进行分析所得到的影响函数曲线。

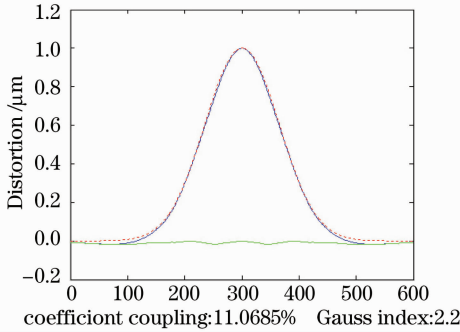


图 12 可拆卸变形镜影响函数分析曲线

Fig. 12 Influence function for DM with replaceable actuators

### 3.2 可拆卸大口径变形镜样镜的研制结果

图 13 为自行研制的一个口径为 284 mm × 284 mm,单元数为 17 的可拆卸大口径变形镜样镜实物照片。表 1 为变形镜样镜镜面变形量检测结果。图 14~图 16 分别给出了该变形反射镜样镜驱动器的迟滞响应、影响函数以及频率特性的性能测试结果。

根据 17 单元可拆卸变形镜样镜的实际测试结果,该变形镜的主要性能指标如下:

- 1)口径:284 mm × 284 mm

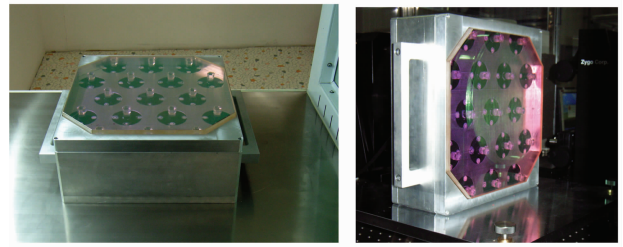


图 13 单元数为 17 的可拆卸大口径变形镜样镜

Fig. 13 Photo of the 17-element DM prototype with the replaceable actuators

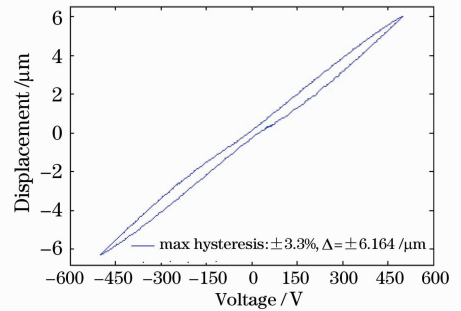


图 14 变形镜样镜驱动器的电压-变形特性曲线(非线性滞后为 ±3.3%)

Fig. 14 Hysteresis curve for the 17-element DM prototype with the replaceable actuators

- 2)行程: > ±6 μm
- 3)谐振频率: > 500 Hz

此外,还测试了此变形镜拟合离焦和像散像差的校正能力。图 17,18 分别是 17 单元可拆卸变形

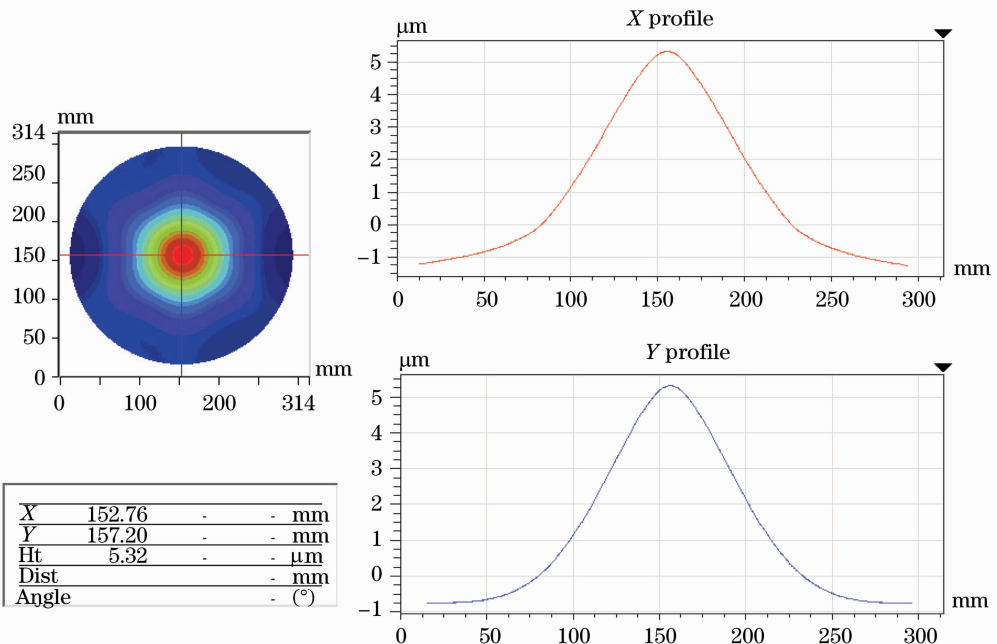


图 15 变形镜样镜中心点的面形影响函数(交连值为 7.5%)

Fig. 15 Influence function of the central actuator for the 17-element DM prototype

反射镜拟合离焦和像散像差的初步实验结果。必须指出,在像差拟合实验中,所拟合的光束口径为 $\phi 250\text{ mm}$ ,拟合中只是通过人为调整驱动器电压对像差进行拟合,并未对拟合像差做精确控制,因此所

测试的拟合残余误差还可通过系统精确控制进一步减小。结果表明,该变形镜能够对ICF激光系统中的离焦和像散等低阶像差进行有效校正。

表1 变形镜样镜镜面变形量检测结果

Table 1 Measured results of the stroke of deformable mirror

Number of actuator	9 <sup>#</sup> (center)	6 <sup>#</sup> (first ring)	2 <sup>#</sup> (second ring)
+500 V stroke / $\mu\text{m}$	+6.37	+6.58	+7.38
-500 V stroke / $\mu\text{m}$	-6.55	-6.85	-6.96
$\pm 500\text{ V}$ mean stroke / $\mu\text{m}$	$\pm 6.46$	$\pm 6.72$	$\pm 7.17$

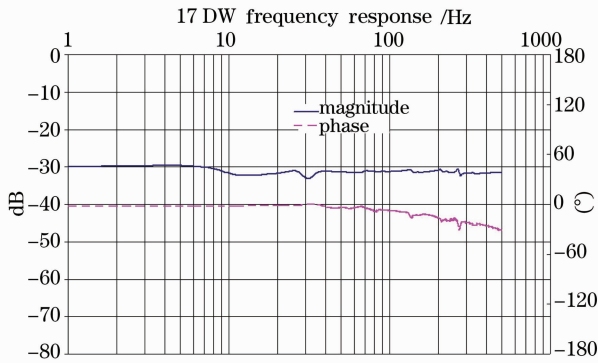
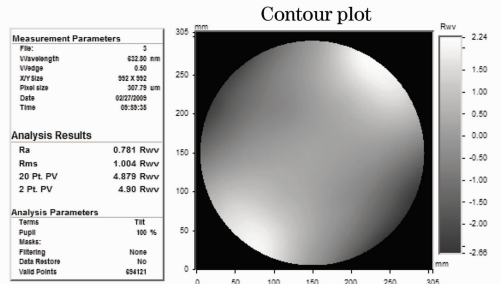


图16 变形镜样镜的频响特性曲线,谐振频率 $>500\text{ Hz}$

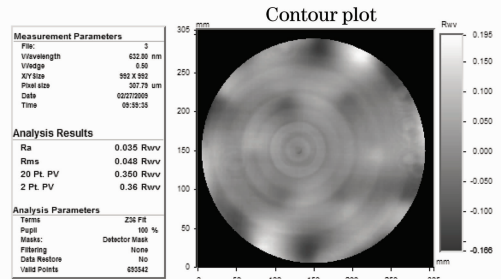
Fig. 16 Frequency response of the 17-element DM prototype with the replaceable actuators

由17单元可拆卸变形镜样镜的实验测试结果验证了该结构的可行性,为未来ICF系统所需的更大口径可拆卸变形镜(有效口径可能需要 $360\text{ mm} \times 360\text{ mm}$ )提供了技术基础。这种大口径可拆卸变形



Title: Astigmatism Fitting

Note: New Technology DM by IOE



Title: Astigmatism Fitting

Note: New Technology DM by IOE

图18 17单元变形镜样镜拟合出的像散面形和残差

Fig. 18 Fitted astigmatism aberration and its residual error using the 17-element DM prototype with the replaceable actuators

镜具有以下优点:

- 1)该结构中压电驱动器与镜面不直接连接,驱动器更换容易、变形反射镜维护方便;
- 2)该结构中镜面、驱动器不直接连接,镜面光学加工、镀膜可与驱动器的加工并行,能缩短变形反射镜的制造周期;
- 3)该结构镜面镀膜是在与驱动器组装前完成的,不受压电驱动器居里温度点限制,可降低变形镜镀膜技术难度。

## 4 基于靶室远场的SPGD控制技术 研究进展

### 4.1 SPGD 算法原理

随机并行梯度下降(SPGD)搜索算法是目前应用于自适应光学的无波前传感器校正算法中较为常

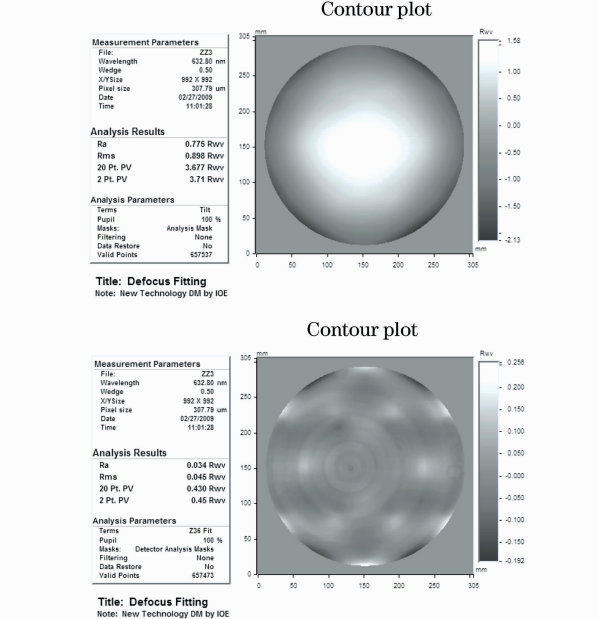


图17 17单元变形镜样镜拟合出的离焦面形和残差

Fig. 17 Fitted defocus aberration and its residual error using the 17-element DM prototype with the replaceable actuators



用的一种。相对于其他的一些搜索算法,如遗传算法 (GA-genetic algorithm)、模拟退火 (SA-simulated annealing)、模式提取算法 (Alopex-algorithm of pattern extraction)等,SPGD 算法运用于自适应光学时,具有收敛速度快、实现更简单的特点,适当地选取收敛指标和算法中的参数还可以保证 SPGD 算法收敛的准确性<sup>[11~13]</sup>。

SPGD 算法是美国陆军研究院 M. A. Voronstov 等<sup>[14]</sup>提出的,算法的基本思想可以这样描述:设当前的驱动控制器电压为

$$\mathbf{u}^{(k)} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\},$$

第  $k$  次迭代时,小的随机扰动向量

$$\{\delta u_j\}, (j = 1 \dots N)$$

被并行地施加到波前校正器的  $N$  个驱动器中。此时性能指标产生的相应变化  $\delta J$  为

$$\delta J = J(u_1 + \delta u_1, \dots, u_j + \delta u_j, \dots, u_N + \delta u_N) - J(u_1, \dots, u_j, \dots, u_N),$$

然后使用性能指标的变化量  $\delta J$  和随机扰动向量  $\{\delta u_j\}$ ,进行第  $k$  次迭代的梯度估计(当  $\delta u_j$  前符号为负时称为负向扰动,反之为正向扰动)。在梯度下降的方向进行控制参数的迭代

$$\mathbf{u}^{(k+1)} = \{u_j^{(k+1)}\} = \{u_j^{(k)} - \gamma \cdot \delta u_j^{(k)} \cdot \delta J^{(k)}\},$$

式中假设向着性能指标下降的方向优化, $\gamma$ 取正数。

#### 4.2 基于 SPGD 算法的 ICF 装置波前校正原理实验

为了验证 SPGD 算法在 ICF 装置波前校正的可行性,在实验室环境中仿照自适应光学在 SG III 主机装置的配置形式(如图 19)所示,模拟了 SPGD 算法对这几种不同的波前校正方式的使用效果。光路描述如下:从光源发出的光束经像差板后进入变形镜,经变形镜校正后的光束透过半反镜和像差板进入反射镜;反射出来的光束经再先后经过像差板和半反镜反射进入并行光管,并最终在 CCD 上成像。

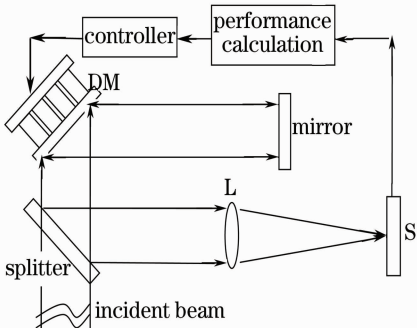


图 19 实验中采用的光路图

Fig. 19 Optical configuration for experiment

计算方式为

$$J = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sqrt{i^2 + j^2} I(i, j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)},$$

式中  $i, j$  为坐标; $N, M$  为 CCD 目标靶面的像素; $I(i, j)$  为点  $(i, j)$  上的光强; $J$  为 MR 指标。

实验中用到的参数如表 2 所示。

实验得到的 MR 指标随迭代次数的变化结果如图 20 所示。这时候半反镜移动到光源出口处,光束经反射镜反射后两次经变形镜进入平行光管,变形镜获得 4 倍的校正行程。

表 2 实验参数

Table 2 Parameters in experiment

Component	Wavelength /nm	533
Aperture	(diameter) /nm	60
	Focus lens	Focal length /m
Deformable mirror	Number of actuators	19 units
CCD	Effect pixel	255×255
	Size of pixel	8 μm×8 μm
	CCD precision	8
	Threshold	5

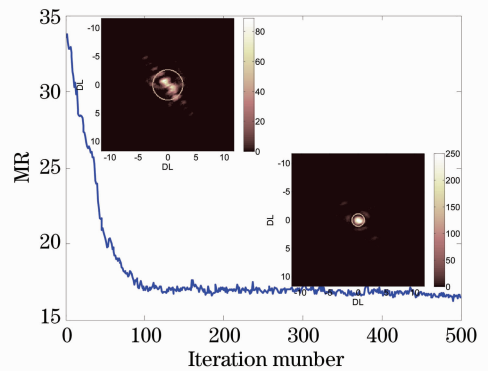


图 20 SPGD 算法的迭代曲线图,插图分别是校正前远场分布(左上角)和校正后远场分布(右下角);插图中的两个圆圈分别表示 84% 的能量环

Fig. 20 MR evolution curve using SPGD algorithm, the embedded figures are for far-field with (top-left corner) and without AO (down-right corner)

校正前后的结果见图 20 所示,其中图中左上角的插图为校正前的结果,右下角为校正后的结果。校正前远场光斑 84% 能量半径为 2.85 个衍射极限,校正后相应的 84% 能量半径为 1.15 个衍射极限;归一化峰值能量从 85 上升至 250;MR 指标从 34 下降至 17。

实验采用远场光斑平均半径(MR)优化指标的

## 5 结 论

介绍了为“神光Ⅲ”原型装置研制的 8 套工程化自适应光学系统的性能以及在原型装置上的实验结果。在原型装置上扩展了自适应光学系统的校正范围,开展了到靶点全系统静态像差校正实验,基于双波前传感器波前校正技术,实现了到靶点的像差校正,改善了靶点焦斑能量分布,在“神光Ⅲ”原型装置上验证了校正对打平面靶时 X 射线分布的改善效果。打靶实验结果表明,采用自适应光学技术可以使靶上 X 射线的分布得到很大改善,从而提高整个 ICF 系统的效能。

为满足未来我国 ICF 领域不断发展对自适应光学系统的技术需求,研制了一块 17 单元大口径可拆卸变形镜样镜。该样镜口径为 284 mm × 284 mm,行程大于 ±6 μm,谐振频率大于 500 Hz,能够有效校正离焦和像散等低阶像差,实现了 ICF 领域用大口径可拆卸变形镜的关键技术突破。

此外还介绍了一种基于靶室远场的 SPGD 控制方法,并取得了良好的室内模拟校正实验结果。

**致谢** 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心景峰研究员、胡东霞副研究员、周维助理研究员、代万俊硕士、赵军普助理研究员、赵润昌研究员等同志在实验中提供的支持与密切配合。

## 参 考 文 献

- 1 R. Sacks, J. Auerbach, E. Bliss *et al.*, Application of adaptive optics for controlling the NIF laser performance and spot size[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 344~354
- 2 R. A. Zacharias, E. Bliss, M. Feldman *et al.*, The national ignition facility wavefront control system, solid state laser for application to inertial confinement fusion conference[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 678~692
- 3 R. Hartley, M. Kartz, W. Behrendb *et al.*, Wavefront correction for static and dynamic aberrations to within 1 second of

- the system shot in the NIF beamlet demonstration facility[C]. *SPIE*, 1996, **3074**: 294~300
- 4 J. Waxer Leon, J. Guardalben Mark, H. Kelly John *et al.*, The OMEGA EP high-energy, short-pulse laser system[C]. *CLEO*, 2008 paper: JThB1
  - 5 J. D. Zuegel, S. Borneis, C. Barty *et al.*, Laser challenges for fast ignition [J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, **49**: 453~482
  - 6 Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubin. Hill-Climbing adaptive optics wavefront correction system[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **15**(1): 17~22  
姜文汉, 黄树辅, 吴旭斌. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. *中国激光*, 1998, **15**(1): 17~22
  - 7 Wenhan Jiang, Yudong Zhang, Hao Xian *et al.*, A wavefront correction system for inertial confinement fusion [C]. *Proc. Second International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*, 1999, Durham, England.
  - 8 Yudong Zhang, Zeping Yang, Haifeng Duan. Characteristics of wavefront aberration in the single beam principle prototype of the next generation ICF system[C]. *SPIE*, 2002, **4825**: 249~256
  - 9 Yudong Zhang, Zeping Yang, Chunlin Guan *et al.*, Dynamic aberration correction for ICF laser system [J]. *Springer Proceedings in Physics*, 2005, **102**: 261~271
  - 10 Zeping Yang, Ende Li, Haiying Wang. Adaptive optical system for a large-aperture Nd: glass laser for ICF[C]. *SPIE*, 2004, **5639**: 21~27
  - 11 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1355~1360  
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1355~1360
  - 12 Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo *et al.*, Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 680~684  
杨慧珍, 蔡冬梅, 陈波等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中应用分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 680~684
  - 13 Yang Huizhen, Chen Bo, Li Xinyang *et al.*, Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 205~210  
杨慧珍, 陈波, 李新阳等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 205~210
  - 14 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration, [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2000, **17**(8): 1440-1453