



DOI: 10.12086/oe.2020.200344

我国惯性约束聚变领域中的波前控制技术

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

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: 在惯性约束聚变(ICF)高功率激光装置中, 自适应光学波前控制技术是确保装置安全顺畅通光以及光束质量达标的关键技术之一。本文介绍了我国 ICF 激光装置中波前控制技术从概念的提出到大规模应用的研究和发展历程, 重点介绍了在装置不同发展阶段针对装置的需求所研究和发展的关键系统技术, 包括基于远场焦斑优化的爬山法波前控制技术、基于双波前传感器数据融合的全装置波前控制技术, 以及旋转腔激光装置结构中基于双变形镜的全系统波前控制技术, 并介绍了相关技术在装置上的应用结果。

关键词: 自适应光学; 神光-III 主机装置; 惯性约束聚变; 波前校正

中图分类号: O439; TN24

文献标志码: A

引用格式: 李恩德, 杨泽平, 官春林, 等. 我国惯性约束聚变领域中的波前控制技术[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200344

Wavefront control technology for ICF facility in China

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

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: In the high-power laser system for inertial confinement fusion, wavefront control is one of the key technologies for the laser system to ensure it operates safely and reaches the beam quality criteria. In this article, the development of the wavefront control technology from its first being putting forward for the ICF laser system to its application in the latest ICF laser system in China was introduced. During the development of the ICF facilities, the wavefront control methods are varying to satisfy the varied demands promoted by these facilities. Based on different facilities, the methods and the application results are illustrated, including the climbing wavefront method for far-field spot optimization, the full-facility wavefront control method based on the data fusion acquired from two wavefront sensors, and the full-system wavefront control method with bi-deformed mirrors in the rotation chamber laser structure.

收稿日期: 2020-08-30; 收到修改稿日期: 2020-09-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助(XDA25020316)

作者简介: 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

通信作者: 杨泽平(1970-), 男, 正高级工程师, 主要从事自适应光学研究。E-mail: zpyang@ioe.ac.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

Keywords: adaptive optics; Shen Guang III (SG-III) facility; inertial confinement fusion; wavefront correction

Citation: Li E D, Yang Z P, Guan C L, et al. Wavefront control technology for ICF facility in China[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200344

1 引言

惯性约束聚变(Inertial confinement fusion, ICF)是利用粒子的惯性作用来约束粒子本身,从而实现核聚变反应的一种方法。其基本思想是:高功率激光脉冲经多级放大后的超高功率脉冲作为驱动源使靶丸中的核聚变燃料(氘、氚)形成等离子体,在这些等离子体粒子由于自身惯性作用还来不及向四周飞散的极短时间内,通过向心爆聚被压缩到高温、高密度状态,从而发生核聚变反应。ICF 是人类产生可控核聚变的重要途径。

ICF 激光驱动器是当代规模最大、最复杂的激光工程^[1-3]。世界范围内建成和在建的装置有美国 NIF、OmegaEP、法国的 LMG 和日本的 GEKKO 等,它们通常包含几十束甚至更多束的激光(比如 NIF 包含 192 路激光),每路激光的光路长达几十米,有几百件光学元件组成。首先,装置中的光学元件制造和装夹误差等静态误差使激光难以集中聚焦到靶上;其次,高功率激光传输过程中产生的光学元件热畸变等动态波前误差也影响到靶光束质量。目前, AO 是校正这一庞大系统波前误差的常用且有效手段。

本文简要介绍了 ICF 激光装置的典型结构,分析了波前误差来源,重点介绍我国从“神光 I(LF12)”、“神光III原型装置(TIL)”和“神光 III”主机装置三个历史阶段、三大激光装置中的波前控制技术,给出了相关的实验结果,最后,对未来 ICF 波前控制技术进行了展望。

2 ICF 激光装置

2.1 装置简介

典型的 ICF 激光装置如图 1 所示,由主振荡器(图中的前端和预放大级)产生放大的可控的低能量脉冲,功率放大器(主放大级)则对输入脉冲进行逐级放大,达到装置所需要的输出功率水平,这里,功率放大通常通过氙灯泵浦的方式来实现;由主放大级输出的激光束经过传输、三倍频变换和靶场光学系统聚焦到靶点;图中的空间滤波器是 ICF 激光装置的重要组成部分,它用于在光束功率按指数规律增大到高功率之前滤除光束中的少量的不规则成分、降低光束空间包络中自聚焦相位畸变,以及根据需实现光束口径的变换;空间滤波器与装置的安全运行有着密切关系。在靶点根据系统设计的驱动方式对靶球进行压缩,最终实现聚变反应^[4-5]。

2.2 装置中的波前畸变

最初把激光用作惯性约束聚变的驱动器是由于其具有产生低发散度高能量短脉冲的能力。在 ICF 系统的研究过程中,根据聚变点火方式的不同,又对激光聚焦时焦斑能量分布形态提出了要求。无论追求什么样的焦斑能量分布,存在于激光束上的波前畸变都是导致光束聚焦特性偏离预期的理想分布的根本因素。

装置示意图如图 1 所示,包括前端(FD),预放模块(PAM),片状放大器(AMP),空间滤波器(SF),三倍频模块(FCU)和聚焦透镜(FL)。由图中可以看出,导致

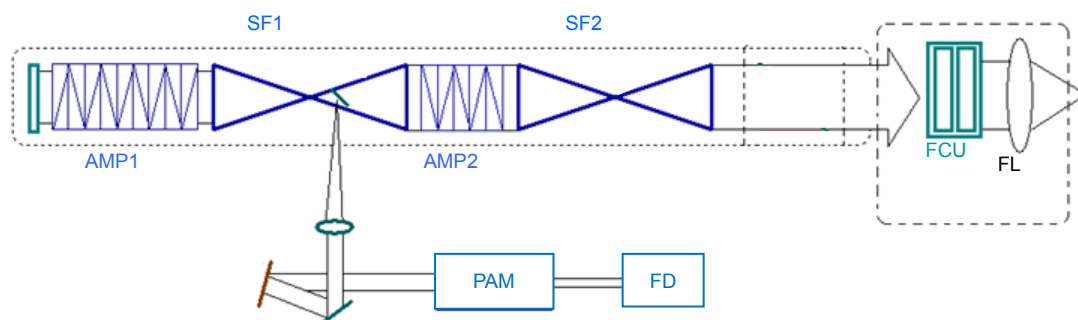


图 1 典型的 ICF 激光装置结构示意图

Fig. 1 Schema of the typical structure of an ICF system

光束质量下降的因素主要包括以下几个方面^[6-7]:

1) 用于 ICF 的激光装置属于大型复杂激光系统, 仅大口径光学元件就可多达千片以上。大量光学元件的生产、装校过程可能给系统带来显著的静态像差; 光学材料本身的缺陷也会导致经过系统传输的光束质量下降;

2) 激光功率放大过程中, 由于氙灯光对增益介质辐照加热, 导致增益介质产生显著的瞬时透镜效应, 最后转化为穿过放大器的光束的波前畸变;

3) 由于玻璃介质热传导率很低, 高功率激光工作后的恢复过程缓慢, 产生的热沉积会往后续发射的激光波前上累积, 带来剩余的热畸变;

4) 由于这样的激光装置都采用了多次通光(多数采用四程放大)的工作方式, 在激光束多次穿过放大器的过程中, 每程波前畸变的叠加将使得最终输出波前上的畸变更加严重。

激光光束质量的下降给 ICF 激光装置带来多方面的影响。首先它将直接导致光束聚焦时焦斑上的能量发散, 进而导致系统工作过程中的等离子体堵孔, 致使放大器产生的能量无法完全到达靶球。其次, 光束质量下降会对激光传输过程造成影响。在 ICF 高功率固体激光装置中, 需要严格控制传输过程, 尤其是中高频相位分量在激光系统中的传输, 以免给激光器带来破坏性的影响。常在激光放大链路的不同位置上放置一系列的空间滤波器, 用来过滤激光波前中的高频信息。但是, 空间滤波器在过滤高频信息的同时, 可能导致波前中的有用部分被滤波器截止, 从而产生光束近场能量调制, 给系统带来破坏性的影响。同时, 光束质量的下降导致三倍频系统的效率大大下降。

总之, 在 ICF 激光装置中, 激光光束的波前畸变严重影响着激光近场光束质量, 并对装置的输出能力和运行安全造成影响, 降低光束的三倍频转换效率以

及聚焦性能, 必须进行有效控制, 以满足激光装置安全运行需要和实现惯性约束聚变对光束质量的要求。

2.3 装置中波前畸变的影响

用作惯性约束聚变的高功率固体激光装置都属于大型激光装置, 装置中大口径光学元件数量众多, 系统复杂, 如果光束质量没有控制好, 不仅不能输出满足实现聚变点火所需要的激光, 装置本身的运行安全也会受到影响。如上节所述, 由于主放大器中包含了大量的大口径增益介质(通常为磷酸盐钕玻璃)以及其它大口径光学元器件, 加上钕玻璃的加工制造、安装等原因, 通常会引入较大的静态波前畸变; 同时, 在装置高功率发射时, 氙灯辐照也会引起钕玻璃片较大的动态波前畸变。当这种畸变达到很高的水平时, 会给装置的运行带来不利影响。图 2 显示了一个波前分布以及系统工作过程中由于空间滤波器堵孔而导致严重近场调制的情况。图 2 表明, 存在于激光束中的波前畸变会给装置运行带来严重影响, 导致光束不能正常穿过空间滤波器小孔, 影响近场能量分布, 使得装置不能进行高功率激光发射, 无法正常运行。因此对装置的各种波前畸变进行严格控制是非常关键的。

影响光束质量的另一个重要因素是激光装置工作过程中的热沉积。图 3 显示了一次激光发射过程结束后的热恢复情况(蓝线和绿线分别代表 PV 和 RMS)。研究表明, 在采取了主动冷却措施的情况下, 由于氙灯泵浦引入的动态畸变在半小时的时间里可以恢复到一半的水平; 然而, 进一步研究表明, 如果不对这部分像差进行主动控制, 系统的恢复时间将长达数小时, 这将大大延长装置的发射间隔。因此, 对这部分波前畸变进行控制, 不仅能改善激光系统输出的光束质量, 还能缩短装置的发射间隔, 进一步提升装置的运行效率。

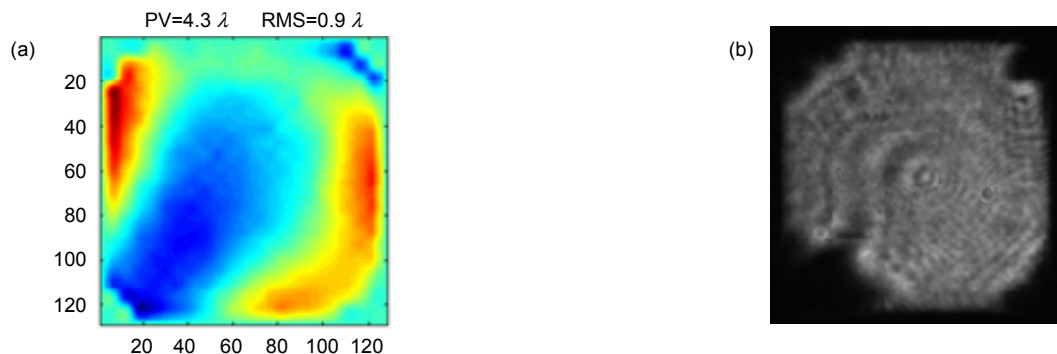


图 2 波前畸变(a)及近场调制(b)

Fig. 2 Wavefront distortion (a) and its near-field modulation (b)

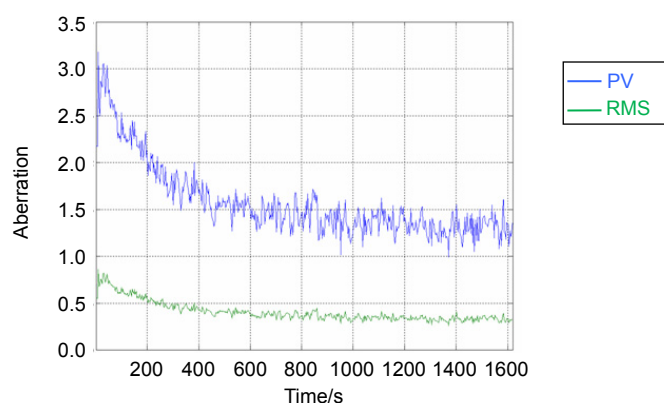


图3 激光系统的热恢复过程

Fig. 3 Heating recovery process of a laser system

除了影响运行效率和安全之外,光束质量下降还可能直接导致系统输出的光束不能满足装置对光束聚焦能力的基本要求。比如,现有的激光系统均要求做到95%的能量集中在10倍衍射极限(DL)内的目标。而在较大的波前畸变的情况下,系统输出光束的水平可能远远偏离这一要求。图4显示的波前畸变,若不进行波前校正时,95%的能量范围约30DL,远远超出了10DL的目标。

综上所述,在ICF激光装置中,波前畸变严重影响装置的运行安全和运行效率,并可能导致输出光束的聚焦性能无法达到物理实验对激光束的基本要求。

3 我国ICF激光装置上的波前控制技术的发展

3.1 “神光I”的波前控制技术

1985年,在“神光I”激光装置的研究过程中,中科院光电所团队创新性地提出了ICF装置中的主动波前控制思想,建立了世界上首个用于ICF激光

装置波前控制的自适应光学系统,该系统基于远场焦斑优化的控制方法实现^[8]。

基于远场优化的光束控制方法有很多种,如爬山法、遗传算法、随机并行优化算法等。各种优化方法的不同在于迭代算法的不同以及实现过程的差异,但从波前控制的角度来看本质上并没有区别。在不同的优化方法的实现中,基本思路均为通过对远场焦斑进行优化,逐步逼近最佳波前,实现最优的远场能量分布^[9]。

通常,基于远场优化的算法迭代周期较长、速度较慢,较难适应需要实时控制的对象。然而,ICF激光驱动器中,其像差主要由以下构成:一是由于光学加工和光学机械系统安装过程引入的静态像差;二是激光装置高功率发射过程中由于氙灯泵浦的热效应而引起的光学元器件的热沉积,这些热沉积导致元器件变形而产生相应的波前畸变,这一类像差具有准静态特性。因此,多数情况下基于优化方法的光束波前控制技术可以适应ICF激光装置上的波前控制需要。

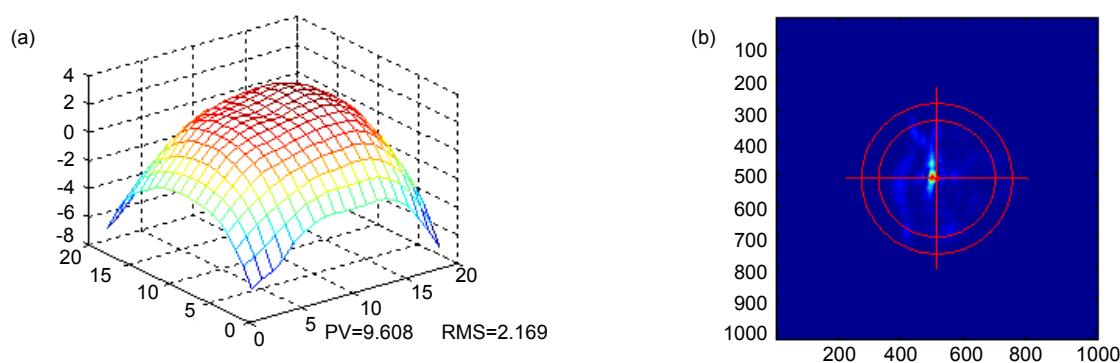


图4 一组波前(a)和远场环能量分布(b)

Fig. 4 Wavefront distortion (a) and corresponding far-field energy distribution(b)

“神光 I”的自适应光学系统采用了基于爬山算法的远场优化控制方法。爬山法波前控制系统通过在控制单元上施加试验扰动,检测目标参数变化的大小和方向,用它来判断在控制单元上应加的校正量方向,在此方向上不断施加校正,直到目标参数达到极大值。基于爬山法的自适应光学系统中,控制单元是变形反射镜各驱动器的变形量,用它改变经过镜面反射后的波前位相。目标参数是远场的光能量。波前误差被校正得越完善,则焦斑越接近衍射极限,远场的峰值能量就越高,可用此参量作为检验波前误差的间接指标。通过这种方法,把远场峰值能量提升了 3 倍,如图 5 所示^[7]。这也是世界上首次实现 ICF 激光装置中的自适应光学波前控制,它首次验证了在此类激光装置上进行主动波前控制的可行性,在随后建立的世界各主要 ICF 激光装置中,自适应光学系统已经成为装置的标准组成部分。

近年来,尽管各种基于远场优化的波前控制算法再次成为研究热点,但在能够有效获取波前信息的情况下,基于波前位相的控制方法仍然是最精确、最直

接、最有效并得到最广泛应用的方法。

3.2 “神光III原型装置(TIL)”的波前控制技术

我国的“神光 III”原型装置(TIL)采用了 70 mm×70 mm 口径、45 单元的变形镜在主放大系统的注入端进行波前校正,并采用了双波前传感器数据融合技术实现了全系统的波前控制,如图 6 所示^[10-12]。

图 6 中,一块通光口径 75 mm×75 mm、45 个驱动单元、校正行程大于 10 μm 小口径的变形镜(DM)放置在放大系统注入端,一台闭环用哈特曼传感器(HS₁)放在参数诊断包中,一台测量用传感器(HS₂)放置在靶点;其中 HS₂完成系统波前测量后即可移出;当靶场段系统的像差出现显著变化,比如光学系统出现大的调整,或者更换元器件时再重新测量。假定 HS₁的传递函数为 H_1 , HS₂的传递函数为 H_2 , HS₂测量到的波前斜率 s_2 ,对应于 HS₁的波前斜率为 s_1 ,则

$$s_1 = H_1 H_2^+ s_2 \quad (1)$$

通过这样的方式我们把 HS₂测量得到的数据传递给了传感器 HS₁。

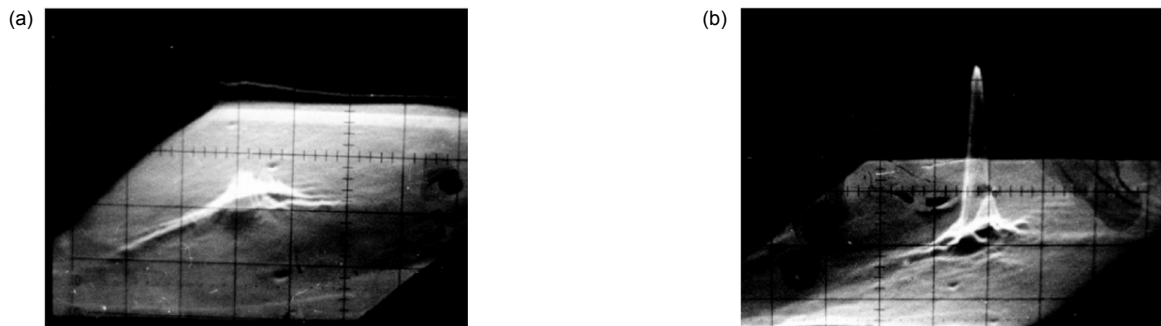


图 5 爬山法校正前后的远场焦斑^[8]。(a) 开环远场; (b) 闭环远场

Fig. 5 Far-field distribution before and after wavefront correction using climbing algorithm^[8]. (a) Open loop; (a) Closed loop

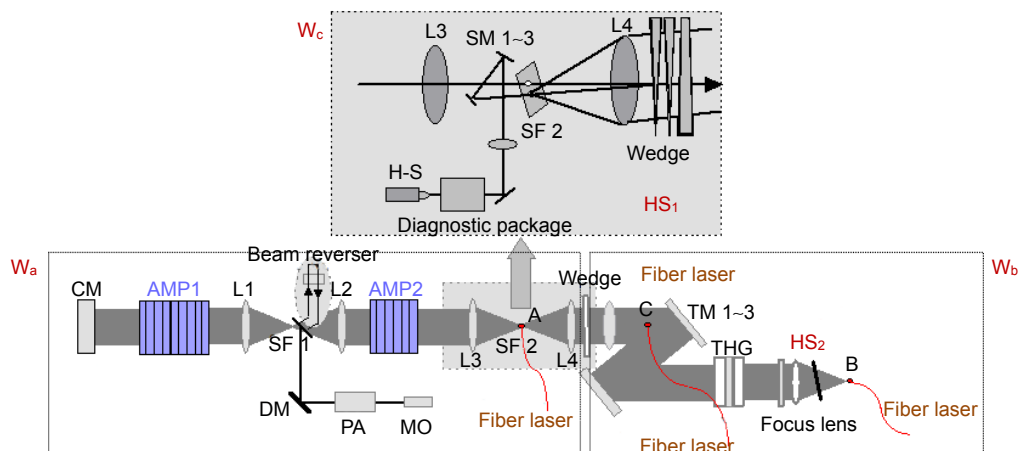


图 6 TIL 装置波前校正系统示意图^[10-12]

Fig. 6 Schema of the wavefront correction system in TIL^[10-12]

在该波前控制系统中,如果只需要对主放大系统输出点的系统像差进行校正,可直接用 HS_1 进行闭环;如果要对全系统的像差进行校正,则采用 HS_2 预先进行系统波前测量,并通过式(1)把数据传递给 HS_1 ,再由 HS_1 进行闭环。图7显示了一组波前校正前后的远场能量分布^[8,10];在线校正结果显示,波前校正系统开环的情况下,95%的激光能量集中在约15倍衍射极限的区域内,Strehl 比为 0.02;闭环校正时,95%的能量集中在7倍衍射极限内,Strehl 比为 0.46,通过校正,焦斑上的能量峰值水平和能量集中度都得到了大幅提升,光束聚焦性能得到显著改善^[8,10]。

3.3 “神光III”主机装置的波前控制技术

SG-III 激光装置如图8所示。该装置采用“腔内四程+助推三程”的多程放大技术方案。腔镜位置设计的光束口径为 320 mm×320 mm,并可达 340 mm×340 mm。系统输出经衰减取样后,进入主放大系统测量包,提供给波前校正系统使用。

该装置的主要特点是在第一、二程(P1、P2)通光和第三、四程(P3、P4)通光时存在口径缩放,激光束两次到达腔镜处时的口径不同,光束第一次到达腔镜处的口径是 275 mm,第二次到达腔镜处的口径是 320

mm,但是两次到达腔镜时光束是同心的;第二和第三程通光之间存在光束 90°旋转,从而可以部分自动补偿主放大器的像散。这样的系统结构形成了图9所示的独特激光系统构型,即“光束 U 形反转+90°光束旋转+光束口径变换”构型。

图9中,激光束第一次到达腔镜 CM 时的口径为 D ,经过放大后被注入到光束反转系统,经过 90°旋转和口径放大后再次被注入到放大系统,激光束再次到达腔镜时的光束口径变为 D_0 ,光束口径变换倍率为 $k=D/D_0$ 。

各 ICF 固体激光装置上的研究表明,图8中,腔镜 CM 位置处为最合理的校正位置,从波前控制系统的角度来看至少有如下优势:1) 光束口径较大,光能量密度相对较低,可适当降低对变形反射镜抗激光损伤的要求,降低变形镜激光损伤的几率;2) 腔镜位置处于两次通光的位置,在此处放置变形镜,其校正能力被利用两次,在通常情况下降低对变形镜校正行程的要求,甚至可以降低两倍;3) 由于此处只需要较小的校正行程,从而有利于空间滤波器中的光束过孔,利于装置顺畅通光,进而有利于装置的运行安全。因此,SG-III 装置中,腔镜位置成为首选的波前校正点。

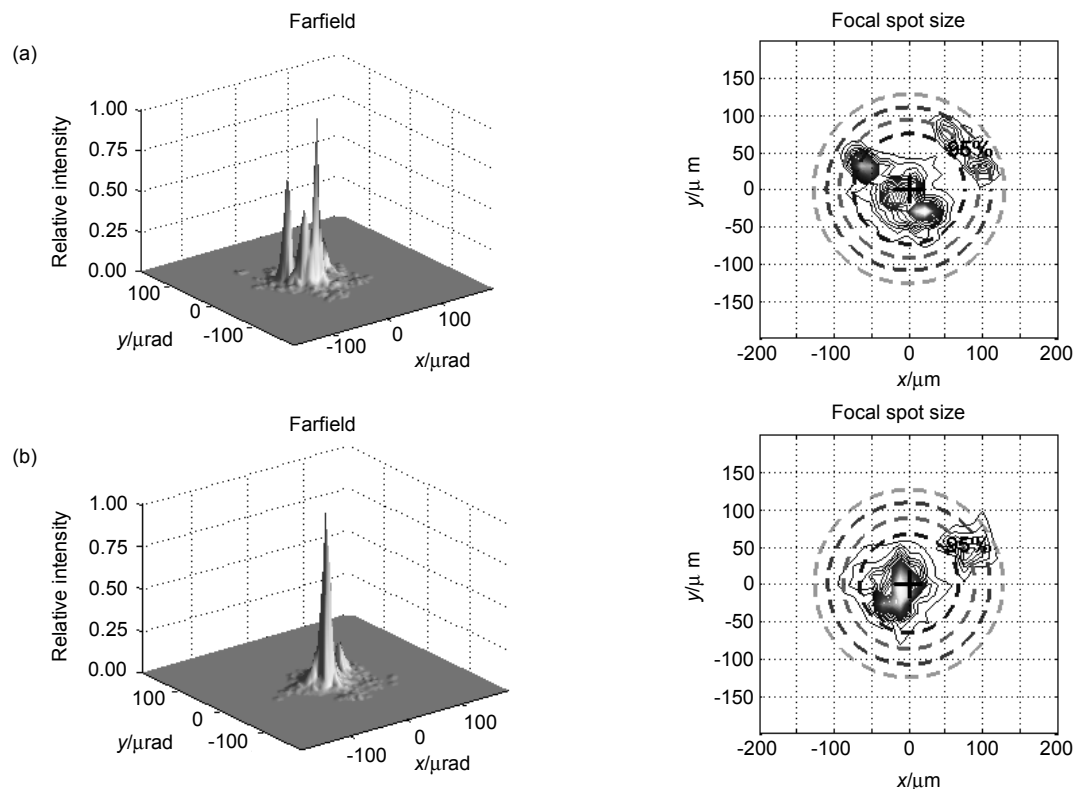


图7 开环和闭环情况下的焦斑能量分布^[13]。(a) AO 开环; (b) AO 闭环

Fig. 7 Far-field energy distribution before and after AO correction^[13]. (a) AO open loop; (b) AO close loop

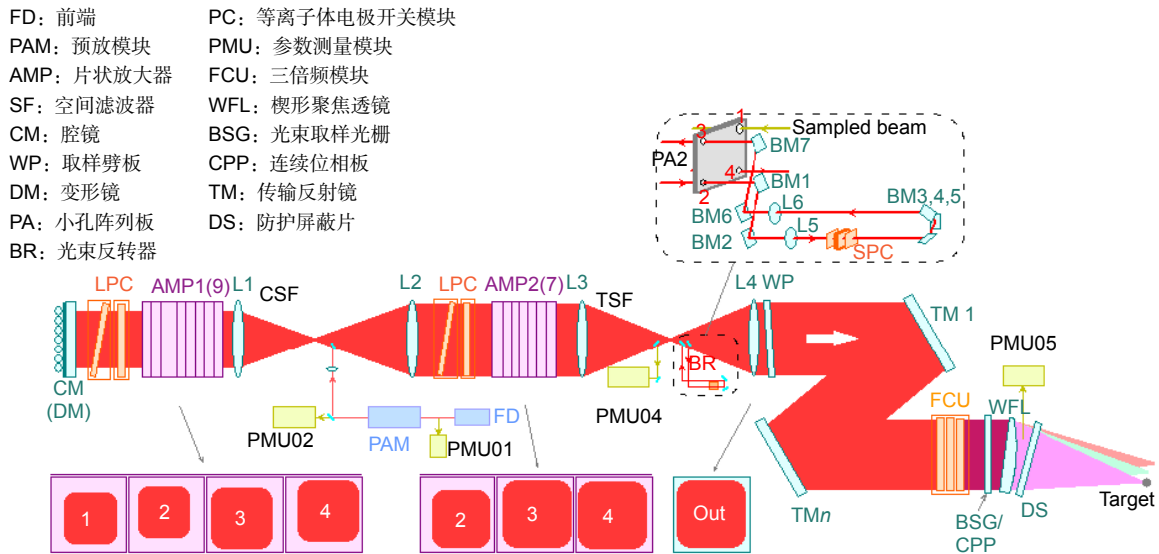


图 8 SG-III 装置单束激光系统结构

Fig. 8 Schema of a single laser beam system in SG-III

SG-III 主机装置区别于世界上其它各国的 ICF 激光装置的最显著特点之一就是采用了前面所述的“光束 U 形反转+90°光束旋转+光束口径变换”构型。这种构型下能否实现波前校正、能否满足以及如何满足系统安全通光的要求就成为了首要问题。

如果变形镜驱动器加单位电压时，镜面上的响应函数为 $f(x, y)$ ，则在 SG-III 中，根据图 9 所示的结构，得到的响应函数为

$$\phi(x, y) = f(x, y) + f(-ky, kx), \quad (2)$$

其中 k 为口径变换倍率， $k = D/D_0$ 。

于是在 SG-III 中，变形镜的响应函数呈现出不同于一般系统的特殊形态，在给变形镜的任何一个驱动器施加控制信号时，都会在变形镜上的相关位置上产生一个伴随的附加响应，如图 10 所示。

SG-III 装置中在腔镜位置上校正能否成立的问

题，实际上是要解决对任意的系统像差 $w(x, y)$ ，是否存在一个变形镜的解 $\phi_{DM}(x, y)$ ，使得

$$w(x, y) = \phi_{DM}(x, y) + \phi_{DM}(-ky, kx), \quad (3)$$

成立。

由于光学系统的像差可以用 Zernike 多项式来展开，因此，我们通过求解 Zernike 多项式对应的 $\phi_{DM}(x, y)$ 的方法来进行证明。把在正方形区域上经过正交化处理的方形域 Zernike 多项式带入上式，我们发现对任意用 Zernike 函数描述的像差，当 $0 < k < 1$ 时，变形镜的解析解总是存在的。也就是说，对 Zernike 多项式而言，上式恒成立。下面给出了一些典型的低阶像差的解。

对离焦函数 $w(x, y) = x^2 + y^2$ ，

$$\phi_{DM}(x, y) = \frac{1}{1+k^2}(x^2 + y^2); \quad (4)$$

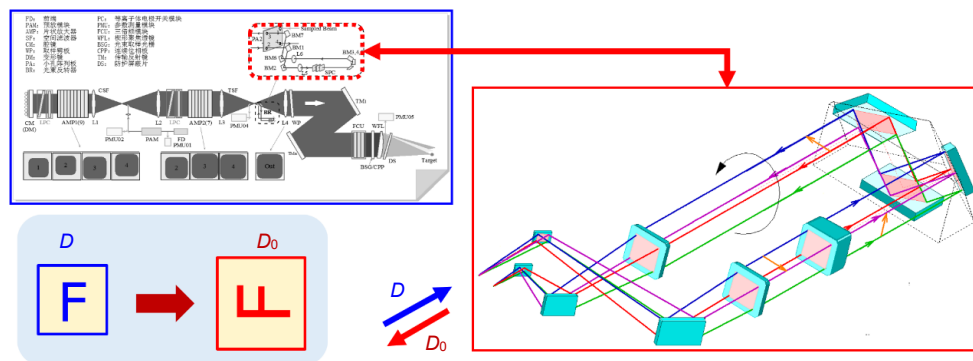


图 9 SG-III 光束反转结构示意图

Fig. 9 Schema of the laser reversion system in SG-III

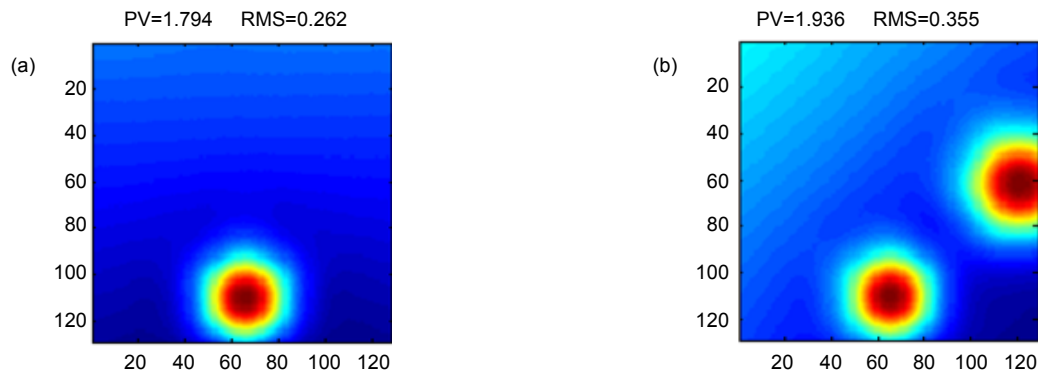


图 10 SG-III 装置中的变形镜影响函数。(a) 不旋光的影响函数；(b) 90°旋光及口径变换的影响函数

Fig. 10 Influence function in SG-III facility.

(a) Influence function without rotated beam; (b) Influence function with 90 degree rotated and scaled beam

对像散函数 $w(x, y) = x^2 - y^2$,

$$\phi_{DM}(x, y) = \frac{1}{1-k^2}(x^2 - y^2); \quad (5)$$

对彗差函数 $w(x, y) = x^3 + xy^2$,

$$\phi_{DM}(x, y) = \frac{k^3}{1+k^6}(x^2y + y^3) + \frac{1}{1+k^6}(x^3 + xy^2). \quad (6)$$

观察上面这些简单低阶像差函数的解, 我们注意到在光束旋转条件下, 即便是简单的像差函数, 变形镜的解可能也有比较复杂的形式; 对圆形区域上的 Zernike 多项式, 变形镜的解具有相对简单的形式, 然而对于方形区域上的 Zernike 多项式, 其表达形式远比圆形区域复杂, 变形镜的解也更为复杂, 因此, 我们用数值计算的方法来考察校正能力。图 11 显示了一个基于 39 单元的变形镜的系统对 Zernike 像差的校正能力, 其中 $k=0.859$ 。

从图 11 中可以看出, 采用一块置于腔镜位置上的 39 单元变形镜, 可以对三阶以内(前 10 项)Zernike 像差进行很好的校正, 对 PV 值的校正残差小于 10%。对 SG-III 而言, 其波前校正目标之一是通过波

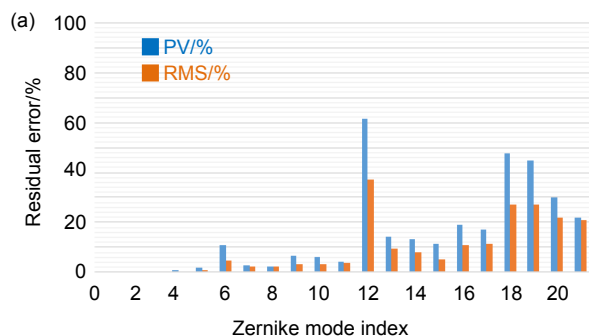


图 11 39 单元 AO 系统对 Zernike 像差的校正能力

Fig. 11 The correction ability to Zernike aberrations of an AO system with 39 deformable actuators

前控制, 在安全顺畅通光的情况下, 实现 95% 的能量集中在 10 倍衍射极限内。图 12 给出了对 8λ 的 Zernike 像差校正后的 95% 能量范围, 可以看出, 对 3 阶以内的像差, 可以很好地满足系统的要求。

我们证明了光束旋转条件下在腔镜位置处进行校正的理论可行性。在不考虑其它限制条件的情况下, 可以实现较小的校正残差, 并可满足系统对 95% 的能量集中在 10 倍衍射极限内的要求。仅仅从波前控制的角度出发, 并不能看出旋光校正和不旋光校正的差异。然而, 如果深入考察波前校正系统的工作状态, 就会发现光束旋转情况下的校正会使得系统存在潜在的风险。

观察式(5), 注意到在像散表达式的前面有一个系数 $\gamma=1/(1-k^2)$, 由于 $0 < k < 1$, 所以 $\gamma > 1$; 当 $k=0.859$ 时, $\gamma=3.815$, 这意味着当对像散进行校正时, 从变形镜上出射的波前是被校正波前的 3.815 倍; 对 SG-III 装置所要求的最大 8λ 的像差, 相当于变形镜上出射的波前是 30.520λ , 这将在变形镜之后 30DL 的小

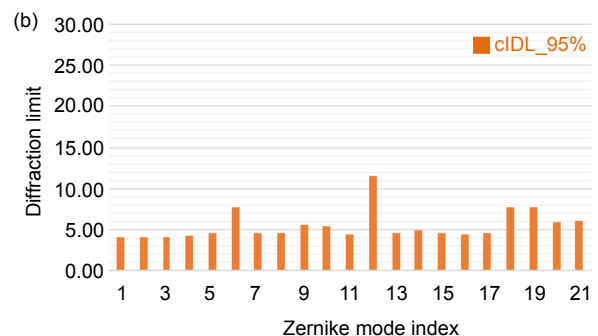


图 12 校正后 95% 能量范围

Fig. 12 The 95% energy range after correction

孔上形成图 13 所示的能量分布,显然,这将使得光束无法正常穿过变形镜之后的小孔,引起严重的近场调制,影响到装置在高功率条件下的运行安全。

解决上述问题的途径主要有两种:一是控制装置中像散类型像差的水平,在目前的工艺条件下,该方法有相当大的困难;二是不再对激光束直接校正,而是对主放大系统的双程像差进行校正,相当于给激光束构造一个“无像差”的通道,必要时优化校正量以确保通光要求,同时在主放大器输出后追加一级校正,来解决能量集中度的问题。方法二更容易实现,因此我们设计了如图 14 的校正方案。

图 14 中,一块 39 单元的变形镜放在主放大级的腔镜位置处,与主放大级哈特曼波前传感器构成闭环回路,此为第一级校正;一块 77 单元的变形镜放置在激光装置的靶场投射镜位置处,与置于靶点的哈特曼传感器构成闭环回路,此为第二级校正。第一级校正对主放大系统的静态和动态波前进行校正,从而给激光束提供一个近似无像差的光束通道。这一级校正主要用来解决主放大系统的安全运行问题,保障装置顺畅通光;第二级校正采用常规自适应光学系统的工

作模式,对主放大系统之后的波前畸变以及第一级校正的残差进行进一步控制。这一级校正主要用来保证光束正常进靶。

图 15 为一组开环和闭环情况下激光发射时的远场和近场能量分布。其中图 15(a)和图 15(b)为较低能量(2543J)发射时的远场和近场能量分布。可以看出,开环情况下,即使能量水平较低,但由于像差的存在,导致激光能量弥散,在穿过两级空间滤波器时被滤波器小孔滤波后,部分有用的低频成份也被截止,从而产生整个光瞳面上严重的强度调制,会影响装置的运行安全。图 15(c)和图 15(d)为高功率激光(7989J)发射时的远场和近场能量分布。虽然能量水平大幅度提升,但通过对波前闭环控制,使得光束聚焦能力得到大幅提升,顺利穿过空间滤波器,系统输出激光束近场能量分布也得到极大改善;同时,通过校正,满足了系统对 95%能量集中在 10DL 内的要求^[13]。

通过对主放大级的波前控制,满足了 SG-III 装置对波前控制技术的最高层次的需求,即保障装置顺畅通光,确保装置安全运行。实际校正后,装置安全地满能量发射运行。

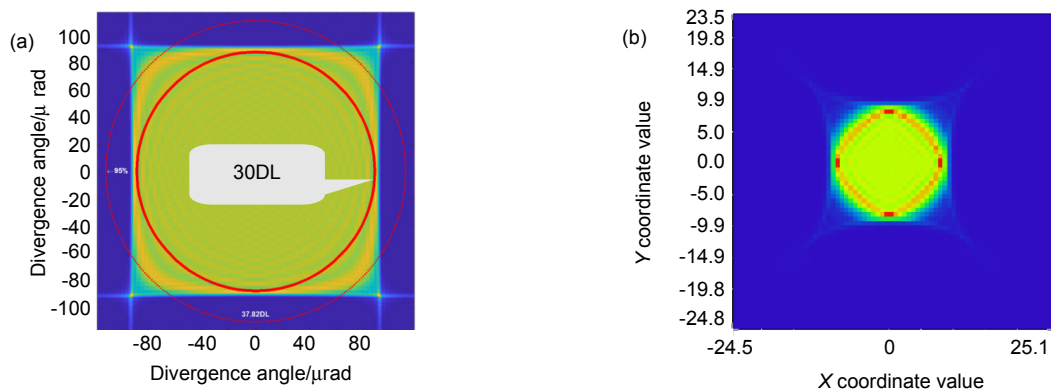


图 13 小孔上的能量分布(a)及小孔后的近场能量分布模拟(b)

Fig. 13 The simulation of the energy distribution on the pin-hole (a) and the near-field energy distribution behind the pin-hole (b)

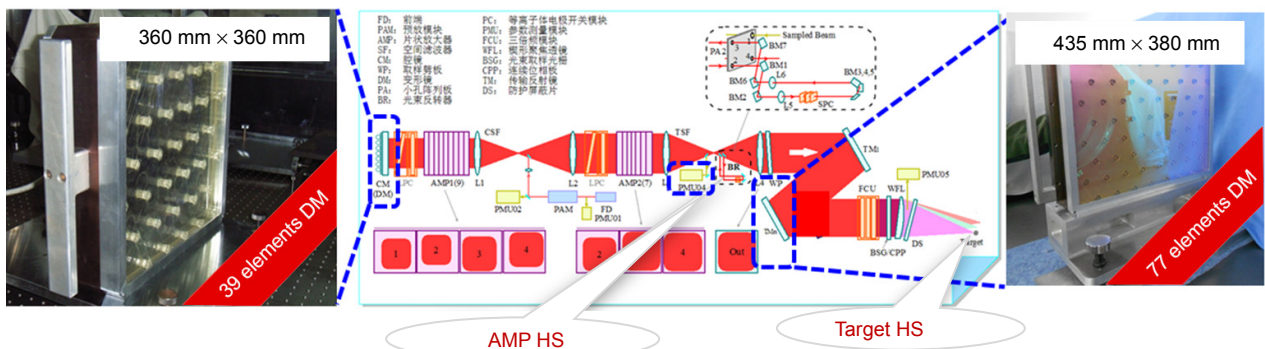


图 14 SG-III 装置波前校正系统方案

Fig. 14 Schema of the wavefront correction system in SG-III facility

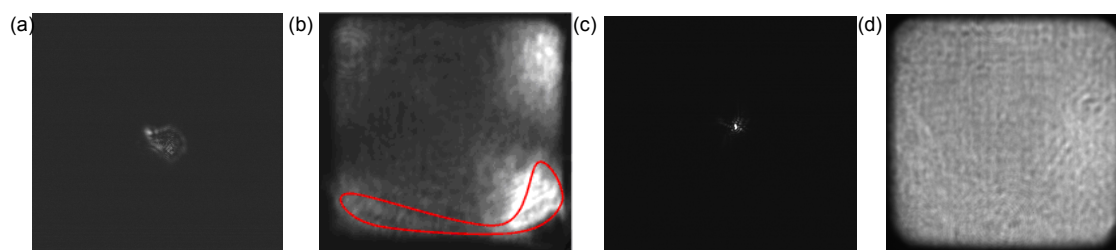


图 15 SG-III 装置波前控制前后的近场和远场能量分布。

(a) 开环远场; (b) 开环近场能量分布; (c) 闭环远场; (d) 闭环近场能量分布

Fig. 15 The near-field and far-field energy distribution before and after wavefront correction in SG-III facility. (a) Far-field open loop; (b) Far-field energy distribution open loop; (c) Far-field close loop; (d) Far-field energy distribution close loop

4 总结与展望

本文介绍了我国 ICF 激光技术发展各阶段中针对我国激光装置的特点开展的相关波前控制技术研究。通过对基于爬山法等远场优化的波前控制技术、基于双波前传感器数据融合的系统全局波前控制技术,以及基于双波前校正器的 90°旋转光束条件下的系统波前控制技术等的研究,为我国 ICF 激光技术的研究和激光装置的研制提供了波前控制解决方案,保障了激光装置的顺畅通光,确保了装置的安全运行和光束质量达标。

未来以聚变点火为直接目标的 ICF 激光装置将具有更大的规模和更高的复杂度,高可靠性、高性能的波前控制是实现激光束高性能聚焦从而实现装置安全高效运行的基本保证。在影响波前控制系统性能的诸多因素中,高效、高质量的系统传递函数获取是决定系统控制性能甚至控制成败的关键要素之一,探索新型系统传递函数获取方法以及相应的系统控制方法将是一项重要任务。

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、代万俊副研究员、王德恩副研究员、薛峤副研究员等同志在项目实施中的支持与密切配合。

参考文献

- [1] Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170489.
姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 170489.
- [2] Jiang W H, Zhang Y D, Rao C H, *et al.* Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900106.
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900106.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [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, Adaptive Optics for Industry and Medicine*, 2015: 8–15.
- [7] 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.
- [8] Jiang W H, Huang S F, Wu X B. Hill-climbing adaptive optics wavefront correction system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1988, **15**(1): 17–21.
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*, 1988, **15**(1): 17–21.
- [9] 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.
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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Zhang Y, Yang Z, Guan C, *et al.* Dynamic aberrations correction in an ICF laser system[M]//Witrock U. *Adaptive Optics for Industry and Medicine*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 261–271.
- [13] 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.
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.

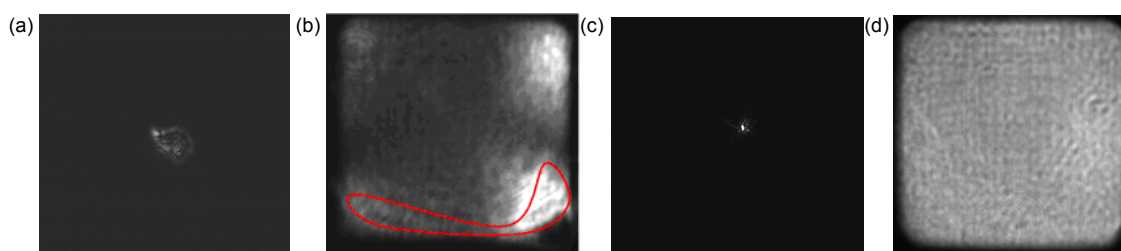
Wavefront control technology for ICF facility in China

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

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



(a) Far-field open loop; (b) Far-field energy distribution open loop; (c) Far-field close loop; (d) Far-field energy distribution close loop

Overview: Inertial confinement fusion (ICF) is one of the most important controllable nuclear fusion processes by confining particles using the inertial effects. A fuel target, typically in the form of a pellet containing the mixture of deuterium and tritium, is converted to plasma by heating and compressing with high-energy beams of laser light. These plasmas explodes and produces sufficient shock waves to compress and heat the fuel at the center, which makes the fusion reaction occur. This article introduces the typical structure of an ICF system first. The effects of wavefront distortion of the laser beams are analyzed. It shows that the wavefront distortion may affect the near-field beam quality and reduce the efficiency of the triper device and focusing. Therefore, wavefront distortion must be effectively controlled to meet the needs of the safety of facilities and the physical parameters to realize the ICF process.

The wavefront control methods are illustrated by introducing the development from SG-I (LF12), SG-III prototype (TIL) to SG-III facility. In LF12, climbing algorithm was utilized in adaptive optics (AO) to optimize the far-field quality. It disturbed the elements of the controller to get the highest peak energy, and the peak energy increased 3 times with the AO system. It was the first time that wavefront aberration in ICF system was compensated by AO. It revealed that it was possible to employ the active wavefront control method in these high-energy laser systems to improve their optical quality. Since then, AO system became a standard component in the ICF facilities.

In TIL, 45-element deformed mirrors with the size of 70 mm×70 mm were employed in the prime-amplification system. Bi-wavefront-sensor fusion technique was utilized for system-wide wavefront control. Two Shack-Hartmann wavefront sensors were used. One was located in the parameter-diagnose package to compensate the wavefront aberration in the prime-amplification system. The other one was placed to the fuel target for the system wavefront measurement, and the result was passed to the first sensor for close-loop control. Without AO, 95% of the total energy was gathered in the zone of size 15 times diffraction limit (DL), and the Strehl ratio was 0.02. After compensation, the values were 7 and 0.46, respectively, and the focusing performance was enhanced significantly.

The “U-type reversion + 90° rotation + aperture transformation” configuration, one of the main characters that makes the SG-III different from all other ICF facilities in the world, brought challenges to the AO system. 39-element deformed mirrors with the size of 340 mm×340 mm were used as chamber mirrors for the wavefront compensation of the static and dynamic aberration in the prime-amplification system. 77-element deformed mirrors, placed close to the fuel target, correct the residual wavefront correction after the prime-amplification system. The result showed that both the near-field and far-field distributions were improved remarkably, 95% energy was concentrated in 10DL, which guarantees the full-energy operation stage of the SG-III facility.

Citation: Li E D, Yang Z P, Guan C L, *et al.* Wavefront control technology for ICF facility in China[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200344

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Science (XDA25020316)

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