

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0225-06

激光驱动器波前补偿系统的方案设计

代万俊 胡东霞 周 维 赵军普 张 崑 蒋学军 景 峰

(中国工程物理研究院激光聚变中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于神光-III 原型装置上自适应光学系统应用获得的理论和实验结果,研究了其中的主要科学技术问题,提出了相应的解决方法,通过实验验证了其有效性。为满足未来大型高功率固体激光驱动器的波前补偿要求,理论上研究了自适应光学系统与连续相位板(PP)相结合的补偿方案。采用数值模拟的方法研究了“大口径变形镜(DM)+1 块连续相位板”和“小口径变形镜+2 块连续相位板”两种方案的波前补偿能力。模拟结果表明,采用“小口径变形镜+2 块连续相位板”的方案能有效地实现全光路系统波前畸变控制,同时还可以兼顾物理实验对焦斑尺寸和均匀性的要求,为未来高功率固体激光驱动器波前补偿方案设计提供理论依据。

关键词 高功率固体激光装置; 波前补偿; 自适应光学; 焦斑

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0225

Research of Wavefront Correction System in Laser Driver

Dai Wanjun Hu Dongxia Zhou Wei Zhao Junpu Zhang Kun Jiang Xuejun Jing Feng

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Based on the theoretical and experimental results of adaptive optics system application in SG-III prototype facility, the main scientific and technical problems were researched and solved, the efficiency was verified by experiment. In order to fulfill need of future high power solid-state laser driver wavefront correction, the scheme of combined adaptive optics system with continuous phase plate (CPP) was researched in theory. “One big deformable mirror (DM) with one CPP” and “One small DM with two CPPs” schemes were analyzed by numerical modeling. The result showed that the latter scheme can achieve the goal of controlling the entire beam wavefront, and fulfill the need of focal spot size and uniformity for physics experiment. The results can also provide theoretical reference to design wavefront correction system in high power solid-state laser facility.

Key words high power solid-state laser facility; wavefront correction; adaptive optics; focal spot

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)间接驱动方法要求对靶面焦斑分布进行精确有效的控制^[1,2]。当聚焦光束通过黑洞靶的激光入口时,必须保证焦斑边缘具有较低的能量分布,同时还要兼顾物理上激光等离子体发散的稳定性。这就要求对靶面焦斑的主瓣形状和尺寸进行有效控制,同时保证最小的旁瓣。对焦斑主瓣的控制主要采用自适应光学(AO)技术^[3,4]和连续相位板^[5,6]。连续相位板可以补偿光路中大部分的静态波前畸变,但一旦激光系统由于热效应、元件更换和光路改造等引起系统输出波前畸变发生变化时,连续相位板对新的畸变量无法跟踪补偿。AO技术通过对相位调制器加电控制其面形分布,可实

现激光系统中缓变波前畸变的跟踪校正。为实现 ICF 间接驱动对靶面焦斑精确控制的需要,自适应光学技术是一种必不可少的波前控制手段。另外,由于中高频波前畸变在激光系统中的线性叠加和非线性效应增长,聚焦后焦斑旁瓣能量会随之增加,进洞时会引起等离子体喷射堵孔,降低激光能量的注入效率。目前解决旁瓣问题的主要方法是提高光学元件加工精度,同时采用多级空间滤波器进行低通滤波,抑制中高频成分的非线性增长。除了“相位板+AO”外,为了减小中心焦斑中的热斑点亮度,需要采用光谱色散平滑(Smoothing by Spectral Dispersion, SSD)的方法。SSD 导致这些热斑点快速移动,有效地减小引起等离子体不稳定性的峰值

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 代万俊(1981—),男,硕士研究生,研究实习员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: dwj8wy@163.com

强度。SSD 要求增加的激光带宽会导致频率转换效率的减小,同时会导致焦斑的进一步扩大。

上述几种焦斑控制技术不是孤立的,彼此之间相互补充、相互影响,为实现对靶面焦斑的精确控制,需要分析各种控制技术的控制能力和控制对象,实现多种控制技术之间的有效耦合。本文主要结合国内典型 ICF 激光装置,研究 ICF 激光驱动器波前补偿技术的主要设计方法和原理。

2 波前补偿系统设计原理

图 1 为国内某典型的 ICF 激光装置,装置包含 8 路激光,设计要求激光器的输出能量(1 ns, 3 ω)达

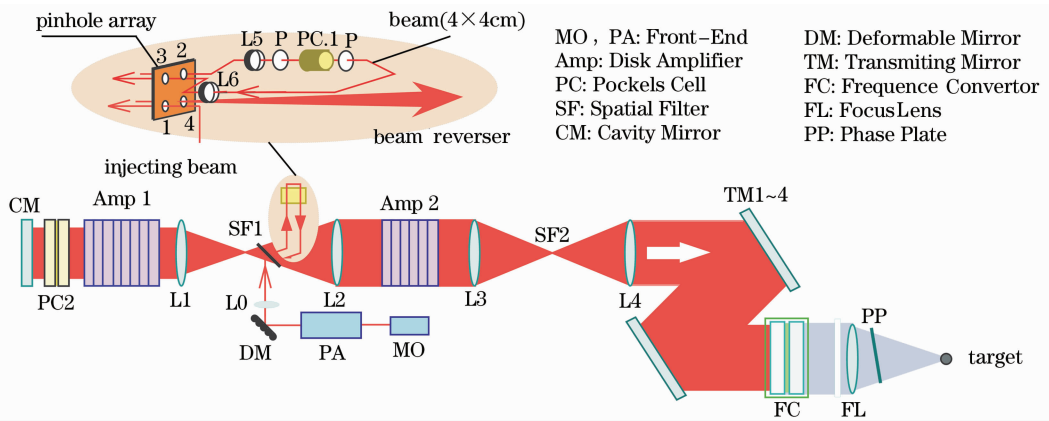


图 1 国内某 ICF 激光驱动器光路结构示意图

Fig. 1 ICF laser driver facility in China

为保证较好的输出光束质量,装置采用了包括长焦透镜、控制光学元件加工指标、90°“U”型反转器、放大介质优化选配等综合手段,并在此基础上采用了 8 套自适应光学波前校正系统,控制 8 路激光主放大输出位置的光束质量。其中,变形镜位于预放出口端,口径为 70 mm×70 mm,哈特曼波前传感器位于主放大测量诊断包内,有效口径为 5 mm×5 mm。实验结果表明,采用上述控制手段实现了“输出基频光在 10 倍衍射极限内集中 95% 能量”的控制要求,保证了靶面 8 路激光对 700 μm 小孔 90% 以上的穿孔效率。

根据装置上波前补偿控制技术大量的理论和实验结果,要实现靶面焦斑主瓣的有效控制需要重点解决两个层次的三类关键问题:主放局部问题,主要解决过空间滤波器的堵孔问题;靶场局部问题,重点解决靶场传输系统的波前畸变检测与补偿问题;全局问题,从全系统的角度解决波前补偿系统的总体布局方案和控制模式^[7]。

2.1 空间滤波器堵孔问题

图 1 中 AO 系统闭环校正后,波前畸变集中在

到 10 kJ。采用多程放大系统,主要由前端、预放级、主放大级、诊断靶场、光束控制与诊断、计算机集中控制系统等 6 大系统组成,其中主放大级采用 4×2 组合式片状放大器,前端种子激光经过预放大后从腔内空间滤波器(SF1)小孔注入到主放大光路,激光两次经过腔内放大器(Amp1)后进入反转器系统(Beam Reverser),光束通过反转器后产生 90°的翻转,随后经过放大器 Amp1(两次)和助推放大器(Amp2)放大,输出基频光经多个大口径反射镜引导至靶场终端系统,经谐波转换为三倍频光,聚焦到达靶点。

前级光路,激光过空间滤波器小孔时焦斑增大,产生等离子体喷射的概率增加,容易造成堵孔^[8]。图 2 是利用神光-III 原型装置反转器位置的测量系统,监测闭环校正前后光斑与滤波孔的相对关系,其中(a)是对小孔成像后获得的小孔图像,(b)是 AO 系统开环状态下激光过小孔时的实际情况,(c)是 AO 系统对激光器主放大系统波前畸变闭环校正后激光过小孔时的情况。闭环校正导致焦斑边角扩散,部分能量延伸到小孔尺寸外,造成堵孔,主放输出近场缺光,见图 3(a)。以前主要采用的技术手段是对变形镜驱动器电压进行限幅,一定程度上可以缓解过孔问题,见图 2(d),但这样就牺牲了 AO 系统的补偿能力。根据图 2(c)中焦斑的分布特点,其绝对尺寸比小孔尺寸小,若考虑改变激光准直的方式,即将“质心”准直方式改为“形心”准直方式,能一定程度上缓解这种过孔问题。同时还可以改进激光器准直与 AO 系统闭环校正之间的工作流程,即在激光器准直前变形镜预先加上次发射时的驱动器电压,然后进行准直,准直后再对系统波前畸变进行闭环校

正, 这样就会缓解激光正式发射时由于闭环校正引入的堵孔问题, 该方法在今年装置运行上得到了充分考核, 如图 3(b)。

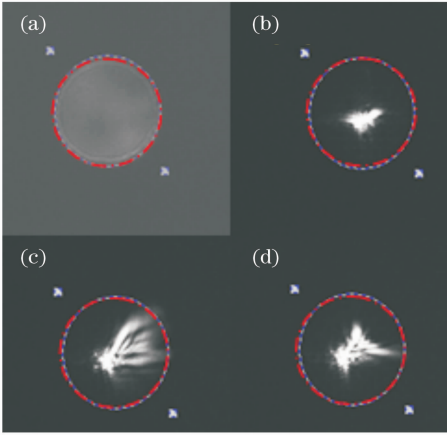


图 2 滤波小孔位置激光焦斑能量分布情况。(a) 小孔尺寸; (b) AO 开环; (c) AO 全电压闭环; (d) AO 限电压闭环

Fig. 2 Focal spot in location of filter hole. (a) size of hole; (b) AO open loop; (c) AO closed loop(full voltage); (d) AO closed loop(limited voltage)

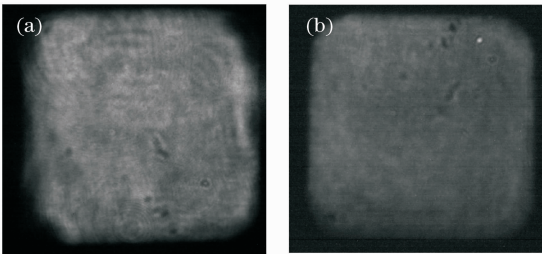


图 3 闭环校正后的近场图像。(a) 准直方式和流程改进前; (b) 准直方式和流程改进后

Fig. 3 Near-field when AO closed loop. (a) before alignment improvement; (b) after alignment improvement

解决过空间滤波器堵孔问题的关键是避免预补偿导致波前畸变过于集中在激光系统的前级位置。可以采用的技术方案有两种: 1) 利用主放大激光两次经过腔反射镜的特点, 在腔反射镜位置放置相位调制元件, 实现波前畸变的“二次补偿”^[9]; 2) 采用多个相位调制元件分段补偿激光系统波前畸变。

2.2 靶场终端光学系统波前畸变补偿

图 1 激光装置中, AO 系统采用前级预补偿的方式, 变形镜位于预放出口端, 哈特曼波前传感器位于主放诊断包内, 主放输出激光由劈板反射取样进入主放诊断包, 经衰减和缩束系统后进入波前传感器, AO 系统的控制对象是主放大级系统波前畸变, 对主放输出后的光学系统波前畸变没有明显的控制

效果, 主放输出后光学系统波前畸变主要由终端大口径反射镜和谐波转换组件引入, 离线和在线测量数据显示, 这部分畸变量幅度较大, 对焦斑能量分布的影响不可忽略。间接驱动方式下, 物理实验要求激光具有较好的能量集中度, 避免等离子体喷射堵塞靶孔, 从而提高激光的穿孔率。因此, 波前补偿系统的设计需要考虑靶场光学系统波前畸变的补偿。

提高靶面焦斑控制能力主要有两种方法: 1) 获得激光到达靶点位置的波前畸变, 对全系统波前畸变进行闭环校正, 保证聚焦前的波前畸变尽可能小; 2) 采用焦斑目标控制的算法, 如传统的爬山法、随机并行梯度下降法等, 直接对靶点位置的焦斑进行控制。具体解决的方法有以下 3 种:

a) 采用点光源, 从靶点逆向返回主放测量包内波前传感器, 标定靶场光学系统波前畸变, 获得全光路系统波前畸变进行闭环校正;

b) 在靶点建立波前测量平台直接测量得到全光路系统波前畸变, 然后对全光路系统波前畸变进行闭环校正;

c) 采用以焦斑为控制目标的控制模式。

2.3 波前补偿系统总体布局和控制模式

考虑 AO 系统布局方式的主要出发点是如何兼顾激光传输和焦斑控制两个重要的问题, 这两方面是相互制约的。激光传输问题主要指过空间滤波器堵孔问题和谐波转换效率问题。

空间滤波器的主要作用是为了抑制中高频调制的非线性增长, 避免光学元件由于自聚焦等因素产生成丝损伤。为了限制激光在靶场系统传输过程中过快的非线性增长, 要求主放输出激光中高频成分尽可能少。另外, 靶面焦斑的旁瓣成分主要由光学元件引入的中高频调制在光路传输过程中的非线性增长导致, 为了限制焦斑旁瓣的能量, 需要对空间滤波器小孔提出比较苛刻的要求。由此可知, 为了保证激光装置安全性和限制靶面焦斑旁瓣能量分布, 必需尽量缩小小孔尺寸。相反, AO 系统主要采用预补偿的方式, 不可避免地会改变系统波前畸变在光路中的分布, 一旦过空间滤波器前波前畸变过大, 就极有可能造成堵孔, 造成激光能量损失。另外, 波前畸变还会影响谐波转换的效率, 必须保证到达倍频晶体前的激光具有较好的光束质量。

综上所述, 波前补偿系统设计方案要实现靶面焦斑能量控制的有效性, 同时兼顾避免空间滤波器堵孔和谐波转换效率的问题。具体到激光装置上, 要求对光路中主放段和靶场段的波前畸变都具有可

控性,保证激光装置运行的安全性和靶面焦斑的精确控制。

3 设计方案和数值模拟

为了提高激光能量提取效率,图 4 将光束反转器从图 1 的放大器 Amp1 后移到放大器 Amp2 后,

这样激光三次经过放大器 Amp2,激光通过的钽玻璃片数目增加。另外,腔反射镜位置光束口径从 240 mm 增加到 320 mm,放大器口径由 300 mm 增加到 400 mm,导致激光通过的钽玻璃片面积增加。在钽玻璃片加工精度不变的前提下,上述因素会导致激光装置的输出光束波前畸变增加。

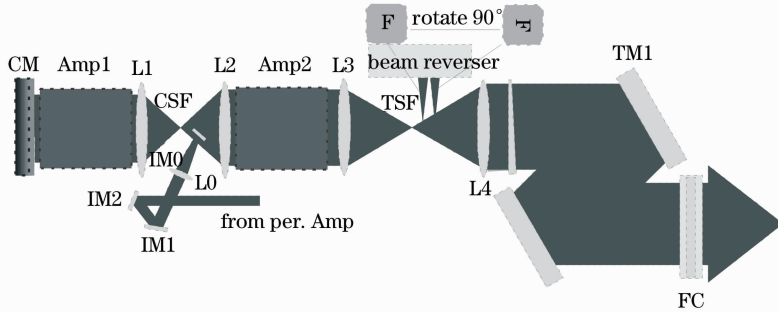


图 4 国内更高功率固体激光装置光路示意图

Fig. 4 High power solid-state laser facility scheme with more energy output

假设放大器 Amp1 和 Amp2 的钽玻璃片均为 9,图 1 激光装置经过的等效钽玻璃片数目为 $5 \times 9 = 45$ 片,钽玻璃片口径为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。图 4 激光装置经过的等效钽玻璃片数目为 $7 \times 9 = 63$ 片,钽玻璃片口径为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,光束经过钽玻璃片的总面积是图 1 中的 2.5 倍左右。图 1 激光装置主放输出波前畸变大约在 4λ 左右,按照比例关系推出图 4 激光装置的主放输出波前畸变在 10λ 左右,如表 1 所示,再考虑靶场段波前畸变随光束口径的增加,图 4 激光装置的输出波前畸变可以达到 15 个波长左右,这里波长为 1053 nm 。

板主要用于控制靶场终端光学系统的波前畸变和部分主放大级静态波前畸变,变形镜采用闭环控制或焦斑目标控制模式,见图 5。腔镜位置变形镜直接采用闭环方式,闭环校正后各级空间滤波器之前的波前畸变见图 6。可见,对过滤波小孔有所改善,但还不能从根本上解决堵孔问题。若将变形镜作为主放光路的补偿片,其过滤波小孔问题将大大改善,见图 7,但残余波前畸变相对较大。模拟结果表明,采用这种方式不能兼顾堵孔问题和校正效果。

根据上一部分波前补偿系统的设计原则,提出两种主要的设计方案。第一种,在腔反射镜位置放置大口径变形镜,在靶场终端系统放置大口径连续相位板,其中变形镜主要用于控制主放大级光路中的波前畸变,同时兼顾靶场部分残留波前畸变,相位

表 1 两大激光装置主放输出波前畸变近似估算

Table 1 Main amplifier wavefront of two laser facility

Nd:glass(9+9)	No. 1 facility	No. 2 facility
Size of amplifier /mm ²	300×300	400×400
Number	45	63
Area /mm ²	4050000	10080000
Wavefront	4 λ	> 10 λ

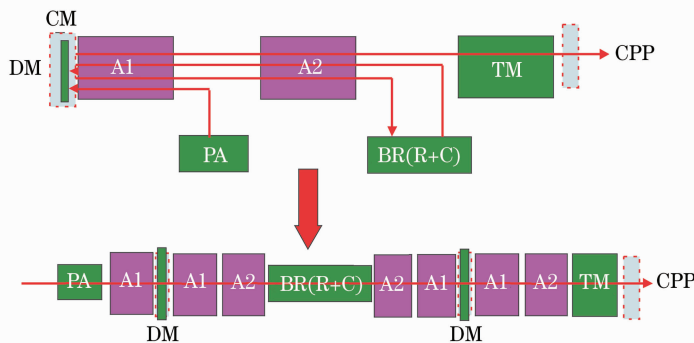


图 5 高功率固体激光装置波前补偿系统(方案一)

Fig. 5 First wavefront correction design of high power solid-state laser facility

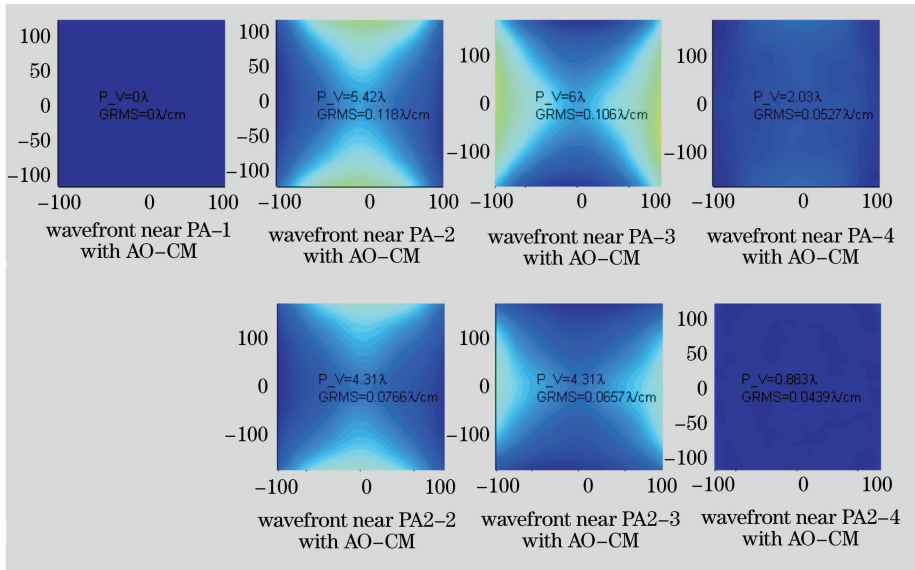


图 6 腔镜位置变形镜闭环校正主放大光路波前畸变后各空间滤波器前的波前畸变

Fig. 6 Wavefront before each spatial filter after DM on cavity closed-loop

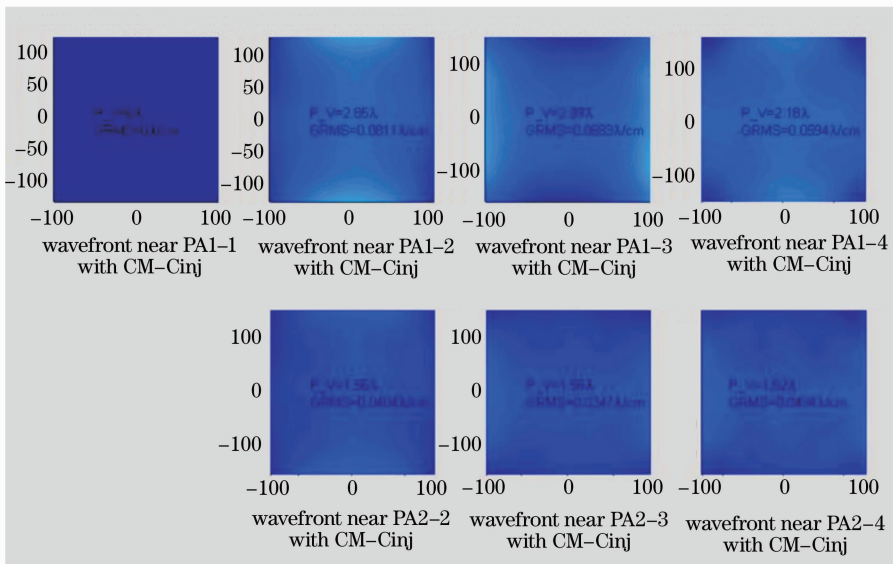


图 7 腔镜位置变形镜作为主放大光路的双程补偿片时各空间滤波器前的波前畸变

Fig. 7 Wavefront before each spatial filter after DM on cavity as a coaxial piece of main amplifier

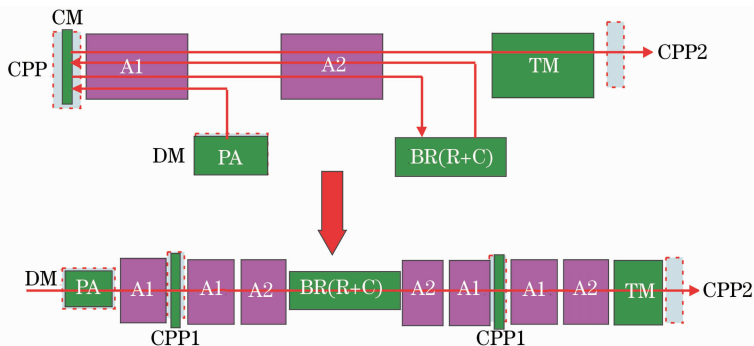


图 8 高功率固体激光装置波前补偿系统(方案二)

Fig. 8 Second wavefront correction design of high power solid-state laser facility

第二种,在预放出口位置放置小口径变形镜,在腔反射镜位置放置大口径连续相位板,在靶场终端光学系统放置大口径连续相位板,腔反射镜位置相位板主要用于控制主放大级大量波前畸变,靶场相位板主要用于补偿靶场系统波前畸变,小口径变形镜用于控制全系统残留小量的波前畸变,可以采用闭环或焦斑目标控制模式,见图 8。其中,腔镜位置相位板与上面类似,将其作为主放大器补偿片,然后根据靶场波前或焦斑的反馈对全系统进行精细闭环,这样就可以同时兼顾空间滤波器过孔和靶场焦斑控制。该方案的应用前提是静态相位板加工技术的成熟和成本的下降,同时对元件的装校提出了很高的要求。

可见,采用“小口径变形镜+两块连续相位板”的方案更具有优势,不仅能大大降低变形镜制造的技术难度和成本,还可以兼顾过空间滤波器和靶面焦斑的控制效果。

4 结 论

根据国内高功率固体激光装置上波前补偿技术的理论和实验结果,提出了高功率固体激光装置波前补偿系统的设计原则,并结合国内典型的高功率固体激光装置基本特点,研究了 AO 系统和 CPP 相结合的两种具体方案。结果表明采用小口径变形镜与相位板相结合的方法可以兼顾主放大级和靶场系统波前畸变的有效控制,并降低变形镜的技术难度

和成本,为高功率固体激光装置波前补偿系统方案设计提供了理论参考。

参 考 文 献

- 1 C. B. Tarter. Inertial fusion and higher energy density science in the United States [C]. *Proc. Conf.*, 2001
- 2 W. F. Krupke. Solid state lasers for application to inertial confinement fusion (ICF) [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 464~471
- 3 R. Zacharias, E. Bliss, S. Winters *et al.*. Wavefront of high-power laser beams in the National Ignition Facility (NIF) [C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 332~343
- 4 M. L. Spaeth, K. R. Manes. National ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2854~2865
- 5 S. N. Dixit, L. M. Thomas, B. W. Woods *et al.*. Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2543~2554
- 6 S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6): 417~419
- 7 Dai Wanjun. Adaptive optics technique application in ICF laser driver facility [D]. Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2007
代万俊. ICF 激光驱动器自适应光学技术应用问题研究[D]. 四川: 中国工程物理研究院, 2007
- 8 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei *et al.*. Application of adaptive optics technique in TIL facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(S1): 102~106
代万俊, 胡东霞, 周 维等. 神光 III 原型装置自适应光学系统应用技术研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(增刊): 102~106
- 9 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei *et al.*. Proof deformable mirror face solution at cavity mirror in four-pass amplifier system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(12): 2001~2003
代万俊, 胡东霞, 周 维等. 四程放大系统腔镜位置变形镜的面形解[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(12): 2001~2003