

神光Ⅲ原型装置自适应光学系统应用技术研究

代万俊 胡东霞 周 维 赵军普 张 崑 蒋学君 景 峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 重点研究了高功率固体激光装置自适应光学系统的两个主要应用问题,包括波前传感器参考波前在线标定和预补偿方式下激光过滤器小孔堵孔问题。文中对两种不同的在线标定方法进行了研究,分析各自的优缺点,结合自适应光学系统的校正对象确定合适的标定方法和标定结果。针对小口径注入位置预补偿的自适应光学布局方案,对影响过滤波小孔的主要因素进行了研究,并从自适应光学系统控制和激光器运行流程两个方面提出了解决方案,获得较好的实验结果。

关键词 自适应光学系统; 高功率固体激光装置; 标定方法; 空间滤波器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0102

Application of Adaptive Optics Technique in TIL Facility

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 Online calibration of wave-front sensor's reference plate and problem of pre-corrected laser being clipped at pinhole are two key factors when adaptive optics system is used in high power solid-state facility. The advantages and disadvantages of the two calibration methods have been researched, and calibration methods and results are chosen by considering adaptive optics system controlling object. For the pre-compensation program, the main factors of laser clipping problem have been researched, and the problem can be solved by adaptive optics system control model and laser system operation process. Satisfying experimental result is achieved.

Key words adaptive optics system; high power solid-state laser facility; calibration methods; spatial filter

1 引 言

自适应光学(Adaptive optics, AO)系统最早应用于天文望远镜光学系统^[1~4],用于实时补偿传输过程中的大气扰动,提高望远镜系统的成像清晰度。在激光器中,伴随着激光的传输和放大过程,不可避免的引入了静态和动态的波前畸变,从而降低了谐波转换效率和输出激光聚焦在靶点的能量集中度。目前波前控制技术较多,传统的方法有优化光学元件和光学结构设计、提高光学元件加工精度和装校精度,还有诸如角锥棱镜^[5]和利用非线性效应的相位共轭技术,但由于 ICF 高功率激光器的能量和传输特性^[6],目前高功率固体激光装置上采用得较为普遍的波前控制方法是 AO 技术。随着 ICF 激光驱动器对输出功率和光束质量控制的进一步要求, AO 技术已成为未来 ICF 激光驱动器发展必不可少

的波前控制手段。AO 技术具有实时波前信息反馈和实时波前校正的功能,可以对激光器中静态和动态的低频波前畸变进行精密控制,一定程度上可以降低激光器系统对光学元件加工和装校等精度的要求。

研究 AO 技术在 ICF 激光驱动器上的主要应用问题,有利于提高对 AO 技术在 ICF 激光驱动器上应用的规律性认识,更好的发挥 AO 系统在激光装置光束控制方面的作用。借鉴美国 Beamlet 和 NIF 装置上的 AO 技术应用后的相关报道^[7~9],结合神光Ⅲ原型(TIL)装置自身的光路结构特点,重点研究了 AO 系统在高功率固体激光装置上应用过程中所面临的两个共同技术问题,通过对问题的认识和解决,提高了 AO 系统在 TIL 装置上的控制效果,为今后 TIL 装置上 AO 技术的进一步应用提供了很好的理论和实验条件,同时也为未来 ICF 激光

驱动器上 AO 技术的总体设计方案奠定了基础。

2 TIL 装置 AO 系统主要应用问题研究

TIL 装置是目前国内输出功率最高的固体激光装置,共八束。图 1 为其单束光路示意图,前端系统输出种子激光经光纤进入预放大系统,经透镜聚焦后在空间滤波器(SF1)小孔位置注入主放大系统,经四次腔内放大(Amp1)和单次助推放大(Amp2)后,经倍频器完成基频光到三倍频光的谐波转换过程,然后经多个传输反射镜引导至靶场,最后经打靶透镜聚焦至靶点位置。TIL 装置采用了一系列的波前控制技术,腔内放大光路中采用了 90°的“U”型反转器,铍玻璃片的组合方式经过了优化,一定程度上降低了主放输出激光的波前畸变。为了进一步控制

输出激光波前,提高谐波转换效率和靶点焦斑的能量集中度,TIL 装置上采用了八套 AO 系统分别对各路激光的波前畸变进行精密控制。与 Beamlet 装置向 NIF 装置过渡的原因相同,为研究 AO 技术在高功率固体激光装置上应用规律和控制效果,TIL 装置借鉴了美国 Beamlet 装置的 AO 技术应用方案,采用了单个小口径变形镜的预补偿方式。图中,波前校正器—变形镜(Deformable mirror, DM)置于预放输出位置,波前传感器—哈特曼波前传感器(Hartmann sensor, H-S)置于主放输出诊断包内。设计的总体控制目标是:使主放大输出激光在 10 倍衍射极限内集中 95%能量,保证倍频器前激光的近场光束质量,提高谐波转换效率。

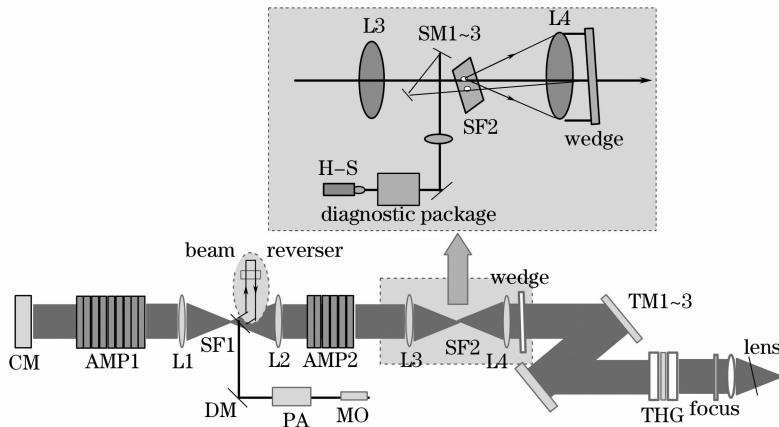


图 1 TIL 装置光路结构和 AO 系统布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TIL facility and AO system layout

2.1 波前传感器参考波前在线标定问题研究

图 1 中助推空间滤波器(Spatial filter, SF2)位置放大的光路系统是主放输出激光的取样和诊断系统示意图,主放输出激光经透镜 L4 后约 1 m 位置的取样楔板反射,一小部分激光小角度反向经过透镜 L4,聚焦后穿过空间滤波器 SF2 取样孔,再经过多个取样反射镜反射,导入主放大参数诊断包内,H-S 位于主放诊断包的末级位置。哈特曼传感器采集得到波前主要由主放大系统、取样系统和参数诊断系统的像差组成^[10,11]。按照设计的总体控制目标,要求 AO 系统能够补偿主放输出位置的激光波前畸变,取样和诊断系统的像差不属于 AO 系统的补偿对象。闭环过程中必须减少这部分像差的影响,目前主要有两种途径:一是改善取样系统和参数诊断系统的像差进行在线标定。第一种方法受光学元件加工

和装校精度的限制,在光学系统已加工装校完成的情况下,通过在线标定来扣除这部分像差是更为有效的方法。

标定的核心是要产生一束光束质量较好的标准光源,经过待标定的光路系统到达哈特曼传感器。实验中采用了两种不同的方法:第一种方法是在图 2 的 A 点放置标准光纤光源,经透镜准直后产生一束平行光从主放输出末端反穿整个取样和参数诊断系统到达哈特曼传感器,到达哈特曼传感器的光纤光源所携带的像差是取样系统和参数诊断系统像差的总和。光纤光源波长与主激光相同(1053 nm),透镜为大口径长焦透镜($f=10$ m);第二种方法是助推空间滤波器 SF2 滤波小孔位置(图 2 中 B 点)架设 1053 nm 光纤标准光源,经透镜 L4 准直,由取样楔板反射光小角度反穿透镜 L4,聚焦后穿过取样孔,再经过多次反射到达诊断包,最后进入哈特曼传

感器。第二种方法的优点是:不引入附加的透镜,标定的光纤光源与主激光到达哈特曼传感器所经过的

光路系统一致,降低了在线标定的光路调试难度,工程上容易形成标准接口。

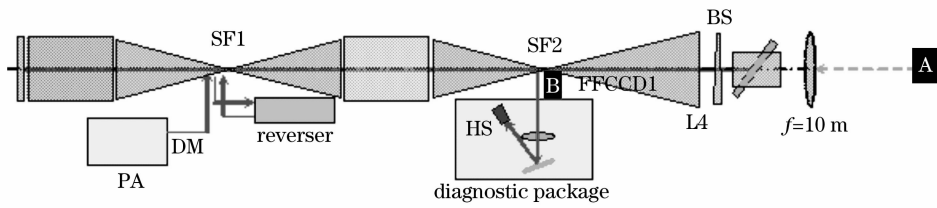


图 2 哈特曼参考波前标定方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of H-S wave-front calibration methods

图 3 为采用第一种方法和第二种方法获得的标定结果,对比标定结果可以发现,两种标定结构存在幅度和分布的变化,通过分析标定过程,可以发现两次标定结果的差别主要源于诊断取样劈板透射波前和反射波前之间的差异,从这个角度可以认为两次标定的结果都是有效的,它代表着 AO 两个不同位置的控制点,即标定点光源的位置即是 AO 校正后远场最好的位置,实验过程中由于远场的监视点位于主放诊断内,因此选择第二种标定结果作为哈特曼传感器的参考波前。哈特曼传感器采集得到的波前扣除在线标定的参考波前,可以得到静态和动态激光发射时 AO 系统需要控制的波前畸变分布,分别如图 4 所示。

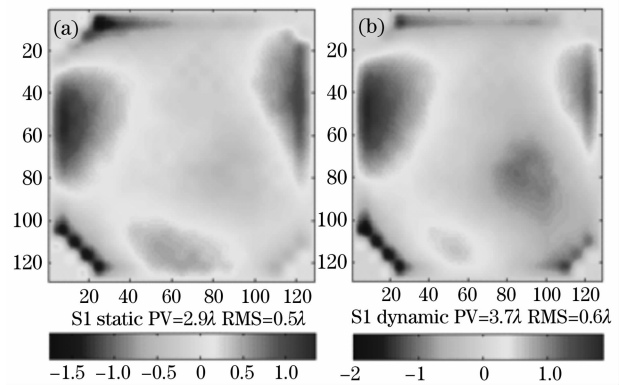


图 4 扣除参考波前。(a)主放输出激光静态像差, (b)主放输出激光动态像差

Fig. 4 (a) Static aberration of output laser, (b) dynamic aberration of output laser without reference wave-front.

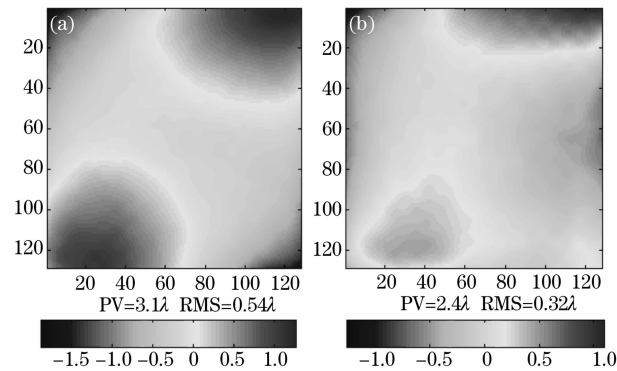


图 3 (a)第一种标定结果, (b)第二种标定结果

Fig. 3 (a) Result of the first calibration method, (b) result of second calibration method

哈特曼传感器参考波前的选择直接决定了 AO 系统的控制对象。在 TIL 装置上,可以通过第一种标定方法实现倍频器后光路系统得像差在线标定,将 AO 系统控制对象向后延伸,达到改善激光在靶点位置能量分布的目的,由于倍频器前后两段光路系统激光的波长不同,需要采用分段标定的方法,这部分工作将会在 AO 系统进一步的应用研究中开展。

2.2 闭环校正引入的过空间滤波器小孔堵孔问题研究

基于 TIL 装置的光学系统结构特点,在采取注入端波前校正的自适应光学系统方案的情况下,由于全系统的像差最后都被集中于第一个空间滤波器小孔位置处(随着光束在多程放大系统中的传输,波前畸变逐渐变小),使得激光在注入孔位置过孔压力增加,容易出现卡光的现象,在近场上则表现为明显的能量缺失,如图 5 所示。从图中可以看出,出现卡

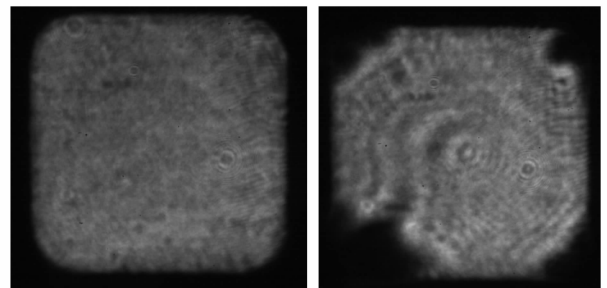


图 5 (a)闭环校正前输出激光近场分布, (b)闭环校正后输出激光近场分布

Fig. 5 (a) Near-field of output laser with AO-OFF, (b) near-field of output laser with AO-ON

孔的地方主要在四个边角位置,由于哈特曼传感器对光束边缘像差的测量不准确,无法通过哈特曼传感器直接测量光束边缘的波前畸变分布,实验中通过径向剪切干涉仪对整个光束的波前分布进行了测量,如图 6 所示。TIL 装置输出激光波前畸变表现为比较明显的中间平、边缘翘的特点,边缘对应的空间频率高,当全系统像差都集中注入孔位置时,在远场位置容易出现卡孔的问题,并且与近场上缺光部位相对应。

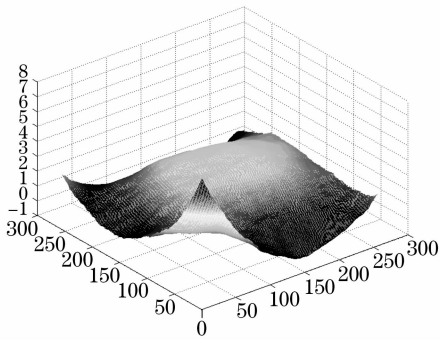


图 6 径向剪切干涉仪测量得到的全光束波前畸变分布
Fig. 6 Aberration distribution of full aperture laser tested by radial shearing interferometer

为进一步研究堵孔的真正原因,一定程度上寻找缓解堵孔导致的能量缺失问题的方法,实验中对

注入孔位置校正前后的远场进行了监视,如图 7 所示。图 7(a)为同一成像系统获得的小孔像面的尺寸,图 7(b)为 AO 系统闭环校正前激光注入时在小孔位置的焦斑大小,此时激光在注入孔位置没有出现堵孔的现象,图 7(c)为 AO 系统闭环校正时激光在注入孔位置的焦斑大小,焦斑形态上出现了类似彗差聚焦后形成的尾巴,尾巴一部分已经超过了小孔的尺寸,在近场上同时出现了缺光的现象,可见输出激光波前畸变中的彗差对校正后的过孔问题有一定的影响。同时也可以发现,事实上整个焦斑尺寸的绝对大小与小孔尺寸相比还是要小一点,只不过整个形态分布出现了一边倒的情况,如果此时重新对光束进行“形心”准直,还是可以解决堵孔问题的,这要求在 TIL 装置的运行流程过程中需要在校正前后进行分别进行准直,由于目前装置都是采用自动准直,准直的时间较长,为了提高装置的运行效率很难同时兼顾,为此还可以通过其它的方法来解决堵孔问题。根据前面的分析,输出激光边缘的波前畸变较大,校正过程中可以通过对边缘驱动器电压限幅的方式来解决堵孔问题,代价是牺牲一定的校正能力,图 7(d)是对校正过程边缘电压限幅后获得的注入孔位置焦斑分布,没有出现堵孔的现象。

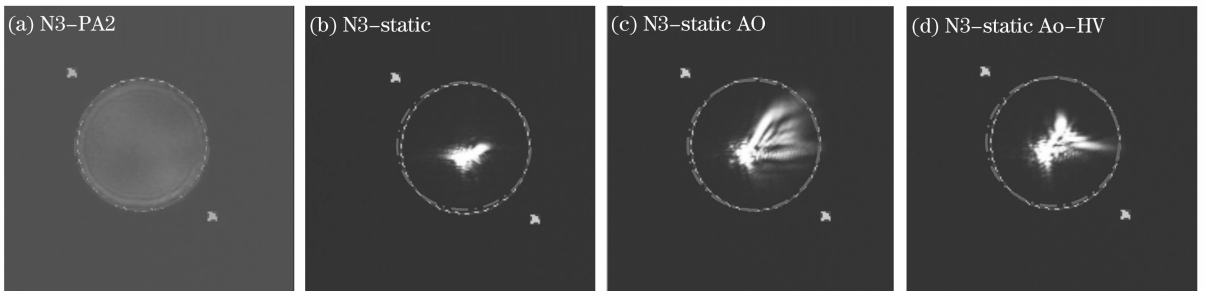


图 7 (a)注入孔像, (b)不校正时焦斑分布, (c)全电压校正时焦斑分布, (d)限电压校正时焦斑分布
Fig. 7 (a) Image of injection hole, (b) far-field with AO-OFF, (c) far-field spot with full voltage AO-ON, (d) far-field spot with limit voltage AO-ON

为了使 AO 系统有效地发挥作用,实验中采取了包括限制对光束边缘位置、尤其是光束口径上四个角位置处的校正量(通过控制边缘驱动器的输出电压来实现)、不校正离焦等方法来改善系统的过孔状况。通过限制校正量,在过孔实验中取得了明显的效果,为以后自适应光学系统的运行找到了一条正常工作的途径。在对每一路变形镜控制电压进行了适当配置之后,基本解决了波前校正之后的过孔问题。将来随着光路自动准直速度的提高也可以通过二次准直的方法来解决校正后的过孔问题,也可以改变自动准直的方式,以“形心”作为目标进行

准直。

3 结 论

实验中,通过对哈特曼波前传感器参考波前的在线标定和对边缘驱动器限幅的方式,较好地解决了 AO 系统应用过程中的两个主要问题,使八路输出激光均达到了 AO 系统设计的控制目标:主放大输出激光在 10 倍衍射极限内集中 95% 能量,如图 8 所示。同时,八束输出激光近场没有出现明显的局部缺光现象,如图 9 所示。

通过 TIL 装置上 AO 技术应用问题的研究与

解决,为 AO 技术在 TIL 装置上的进一步应用积累了很好的经验,也为未来 ICF 激光驱动器 AO 技术

总体方案设计奠定了基础。

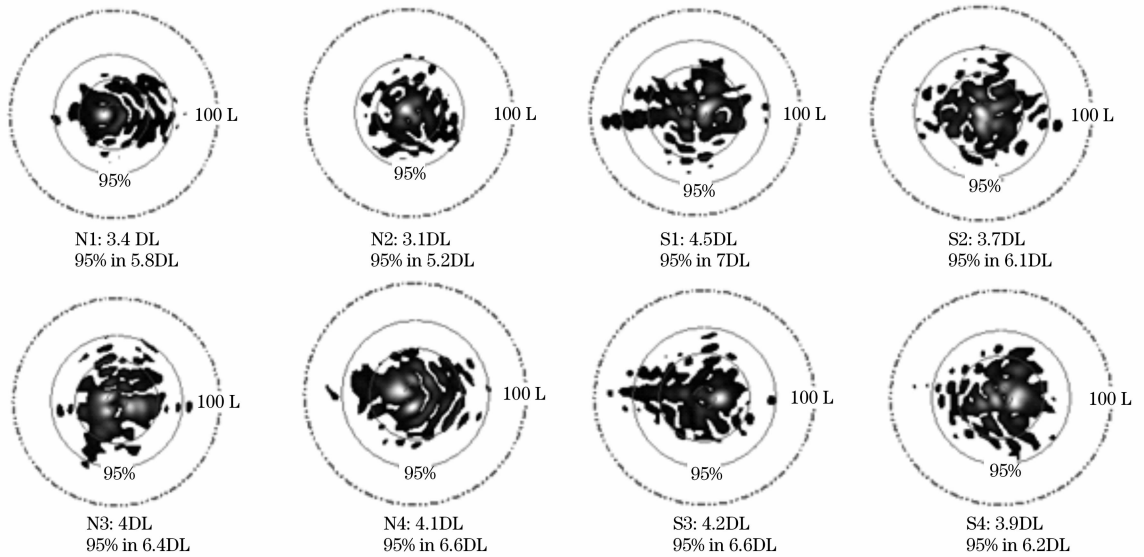


图 8 八路主放输出激光远场能量集中度

Fig. 8 Energy distribution of far-field of 8 beams

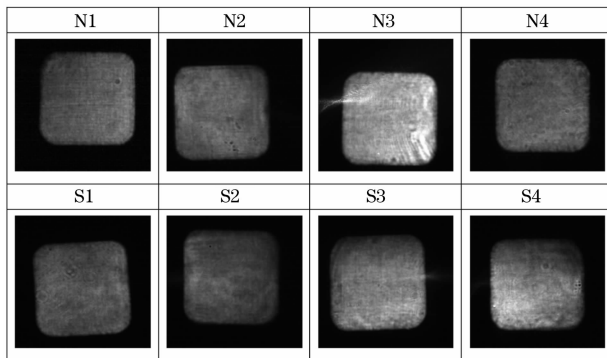


图 9 八路主放输出激光近场分布

Fig. 9 Near-field distribuion of 8 output beams

致谢 实验中得到了成都光电所杨泽平、李恩德等老师的大力支持和帮助,在此表示由衷的感谢!

参 考 文 献

- 1 Richard A. Muller, Andrew Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1974, **64**(9): 1200~1210
- 2 L. A. Thompson. Adaptive optics in astronomy[J]. *Physics Today*, 1994. 24~31
- 3 R. K. Tyson. *Principle of Adaptive Optics* [M]. Academic, San Diego, 1991. 194~204

- 4 Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning. Analysis of compensation effectiveness for adaptive optical system used as low-order modes correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1615~1624
饶长辉,姜文汉,凌宁.低阶模式校正自适应光学系统的补偿效果分析[J].*光学学报*, 2003, **23**(12): 1615~1624
- 5 Ye Yidong, Peng Yong, Chen Tianjiang *et al.*. Numerical simulating of cube corner retroreflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 486~490
叶一东,彭勇,陈天江等.角锥后向反射镜的数值模拟研究[J].*光学学报*, 2003, **23**(4): 486~490
- 6 Zhou Pu, Xu Xiao, Liu Zejin. New technology and new configuration for high energy laser system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 37~42
- 7 J. T. Salmon, E. S. Bliss, J. L. Byrd *et al.*. An adaptive optics system of solid-state laser systems used in inertial confinement fusion[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2633**: 105~113
- 8 R. A. Zacharlas, N. R. Beer, E. S. Bliss *et al.*. Alignment and wavefront control systems of the national Ignition facility[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2874~2884
- 9 Zacharias R, Bliss E, Winters S *et al.*. Wavefront control of high-power laser beam in the national ignition facility[C]. *Proc SPIE*, 2000, **3889**: 332~343
- 10 Zhang Yudong, Yang Zeping, Duan Haifeng *et al.*. Characteristics of wavefront aberration in the single beam principle prototype of the next generation ICF system[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4825**:
- 11 Byron M. Welsh, Brent L. Ellerbroek, Michael C. Roggemann *et al.*. Fundamental performance comparison of a Hartmann and a shearing interferometer wave-front sensor[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1995