

文章编号: 0258-7025(2010)02-0414-04

# 神光 III 原型装置全光路像差闭环校正实验研究

代万俊<sup>1</sup> 胡东霞<sup>1</sup> 杨泽平<sup>2</sup> 周 维<sup>1</sup> 赵军普<sup>1</sup> 张 鑫<sup>1</sup> 张 崑<sup>1</sup> 蒋学君<sup>1</sup> 邓 武<sup>1</sup> 景 峰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院激光聚变中心, 四川 绵阳 621900)  
(<sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 利用置于神光 III 原型(TIL)装置靶室波前测量系统,获得 8 束激光全光路静态像差,将测量结果分别过渡到各路主放参数诊断包内的波前传感器。基于主放注入位置的小口径变形镜和主放参数诊断包内的波前传感器,对全光路像差进行闭环校正,利用 CCD 相机对靶面焦斑进行测量。实验结果表明,全光路像差闭环校正后 8 束激光在靶面位置的焦斑能量集中度有明显改善,验证了小口径变形镜全光路像差的控制能力,满足了物理实验对靶面焦斑能量集中度的控制要求。

**关键词** 高功率激光;自适应光学;波前传感器;波前校正;焦斑

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0414

## Wavefront Closed Loop Correction for Entire Beam Path of Technical Integration Experiment Line

Dai Wanjun<sup>1</sup> Hu Dongxia<sup>1</sup> Yang Zeping<sup>2</sup> Zhou Wei<sup>1</sup> Zhao Junpu<sup>1</sup>  
Zhang Xin<sup>1</sup> Zhang Kun<sup>1</sup> Jiang Xuejun<sup>1</sup> Deng Wu<sup>1</sup> Jing Feng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)  
(<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

**Abstract** Each entire beam path static wavefront of technical integration experiment line (TIL) was obtained by the wavefront measurement system in the target chamber. The result was transited to wavefront sensor in the main amplifier diagnostic package. Based on the deformable mirror at the injection of main amplifier and the wavefront sensor placed at the diagnostic package, the wavefront of entire beam path was corrected with closed loop. A charge coupled device (CCD) was placed at the target point to monitor the laser farfield. As result shows, the energy concentration had visible improvement. The method effectively improves control ability of laser facility entire beam wavefront by small deformable mirror which meets the requirement of physical experiment.

**Key words** high power laser; adaptive optics; wavefront sensor; wavefront correction; focal spot

## 1 引 言

高功率激光传输放大过程中,因光学元件面形缺陷、装校误差和放大器残余热畸变等影响,输出激光的波前发生畸变,导致光束质量下降<sup>[1~3]</sup>。为获得高效三倍频效率,实现小孔进腔打靶,需要对波前畸变进行有效控制。自适应光学(AO)系统能实时补偿激光发射过程中的静态和缓变动态波前畸变<sup>[4,5]</sup>,达到提高远场能量集中度和装置运行效率等目的,是高功率固体激光装置上采用的最为有效

的波前控制技术。

高功率固体激光装置一般采用多级空间滤波器的技术方案<sup>[6]</sup>,实现光束口径的匹配和缩短光束的有效传输距离,同时起到抑制小尺度自聚焦效应和级间隔离的作用。AO系统闭环校正后会改变像差在光路中的分布,造成像差光路局部像差过大,过滤波小孔时造成堵孔。国内外大型激光装置依据自身特点采用了不同的自适应光学系统布局方案。美国国家点火装置(NIF)采用大口径变形镜方案,变形

收稿日期:2009-03-05;收到修改稿日期:2009-04-20

基金项目:国家 863 计划资助项目。

作者简介:代万俊(1981—),男,硕士,研究实习员,主要从事高功率固体激光装置光束质量控制方面的研究。

E-mail: dwj8wy@163.com

镜置于腔反射镜位置,实现像差的“二次补偿”,保证激光通过各级空间滤波器时像差较小<sup>[7,8]</sup>。日本 FIREX-I 装置采用多个变形镜组合补偿方案,分段补偿主放大级系统像差和靶场传输系统像差,有效缓解堵孔问题,并将控制对象延伸至靶场,实现了全光路像差的补偿。神光Ⅲ原型(TIL)装置采用单个小口径变形镜方案,用于补偿主放大光路系统的像差,提高谐波转换效率和装置运行效率。通过准直方式(“形心”准直)和准直流程(“加电-准直-闭环”)的改进<sup>[9]</sup>,有效地缓解了闭环校正后的前级过孔问题。为进一步满足物理实验对靶面激光能量集中度的要求,需要将波前控制对象延伸到靶场。本文基于装置上已有的自适应光学系统,理论上研究了全光路像差测量和闭环校正方法,并通过实验验证了该方法的有效性。

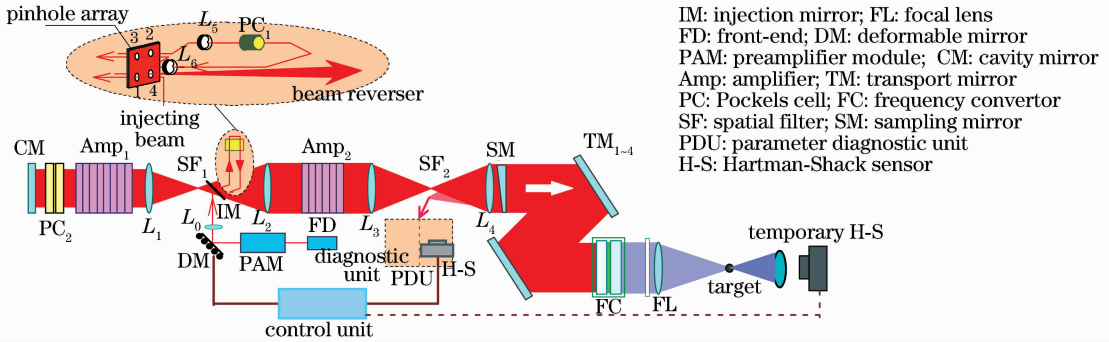


图1 TIL装置光路示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the multi-pass TIL design

为实现全光路像差闭环校正,首先要测量获得全光路像差。可采用的方法主要有两种:1)在靶点位置放置光纤光源,反穿靶场传输系统,与主放大系统像差相加后,获得全光路像差;2)在靶室架设波前测量系统,直接测量全光路像差。第一种方法过程复杂,受中间过程多种因素的影响,测量得到的靶场传输系统像差准确性较差,闭环后远场能量集中度的变化不明显;第二种方法较为简单,影响测量结果准确性的因素较少。

在靶点架设波前测量系统,由准直透镜和 H-S 波前传感器组成。图 2(a)是测量得到的波前,其峰谷值(PV)为 $4.0\lambda$ ,均方根(RMS)值为 $0.730\lambda$ ,这里 $\lambda$ 为 $1.053\ \mu\text{m}$ 。在靶场传输段系统像差较为稳定的前提下,为了实现快速的全光路像差闭环校正,需要将测量结果过渡到主放参数诊断包内的波前传感器,基于主放参数诊断包内的波前传感器完成闭环控制。具体步骤如图 2(b)所示,首先基于靶点波前传感器进行全光路像差闭环校正,然后利用主放诊

## 2 全光路像差测量实验

TIL 装置共 8 路,每路激光器均采用了一套 AO 系统(由中国科学院光电技术研究所研制)。图 1 为单路激光器的光学结构示意图。其中变形镜(DM)置于预放输出位置,哈特曼-夏克(H-S)波前传感器置于主放参数诊断包内(PDU)。前端种子激光经预放放大后,注入到主放大器,主放输出激光经多个大口径引导反射镜(TM)到达谐波转换组件完成谐波转换,再经过聚焦系统到达靶点。其中大口径引导反射镜因加工误差和夹持应力等影响,其面形畸变不可忽略,若不加以控制,会严重降低靶面位置焦斑的能量集中度。因此,为满足物理实验对激光穿孔率的要求,需要将波前控制对象延伸到靶点。

断包内波前传感器采集数据,并将结果设为参考波面,AO 系统开环时主放诊断包内波前传感器测量得到的结果即为过渡后的全光路系统像差。图 2(c)为过渡到主放 H-S 波前传感器的全光路像差,其 PV 值为 $3.43\lambda$ ,RMS 为 $0.729\lambda$ 。图 2(d)是靶点直接测量与过渡到主放参数诊断包内的全光路像差差别,其 PV 值为 $0.6\lambda$ ,RMS 为 $0.1\lambda$ 。可见,过渡后的全光路像差误差较小,对控制效果的影响较小。

## 3 全光路像差闭环校正实验

为验证全光路像差闭环校正效果,在靶点架设远场 CCD,测量 AO 开环和 AO 闭环状态下三倍频焦斑的变化。其中方光束尺寸为 $290\ \text{mm} \times 290\ \text{mm}$ ,聚焦透镜焦距为 $2200\ \text{mm}$ ,1 倍衍射极限(DL)对应的角度为 $2.42\ \mu\text{rad}$ 。图 3(a)为开环状态下采集得到的焦斑分布,图 3(b)为闭环校正后采集得到的焦斑分布,闭环后焦斑出现了较为明显的单峰结构。表 1 详细对比了 AO 两种状态下焦斑环围

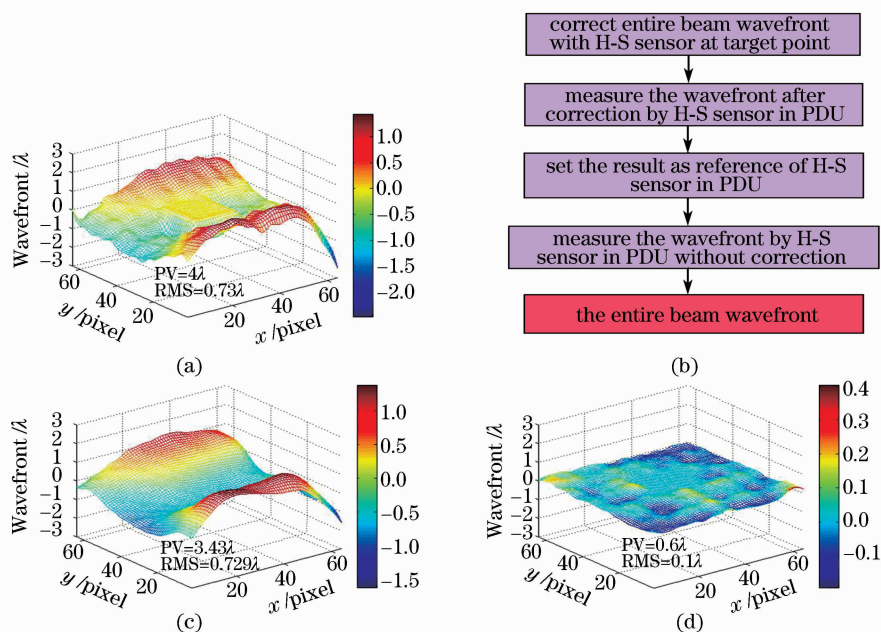


图2 (a) 靶点测量得到的全光路像差;(b) 靶点测量结果过渡到主放诊断包的过程;(c) 过渡后的全光路像差;(d) 过渡前后全光路像差差值

Fig.2 (a) Entire beam wavefront measured by H-S sensor at target point; (b) process of transferring entire static beam wavefront from target to PDU; (c) transferred result in PDU; (d) difference between result at target point and result in PDU

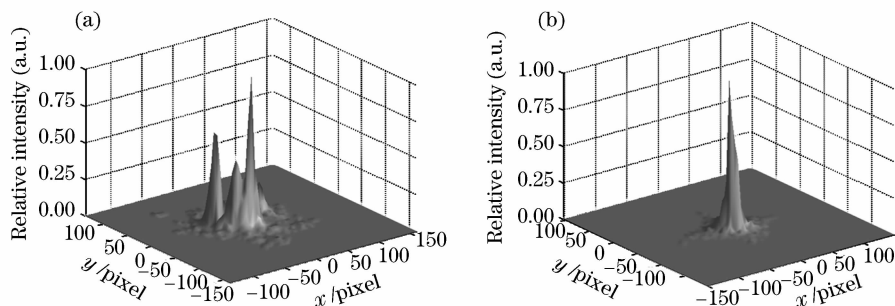


图3 (a) AO开环条件下靶点测量得到的三倍频焦斑;(b) AO闭环条件下靶点测量得到的三倍频焦斑

Fig.3 (a) Focal spot measured at target point without correction; (b) focal spot measured at target point with correction

表1 AO开环和闭环条件下焦斑分析对比

Table 1 Analysis of focal spot before and after correction

Focal spot (encircled energy) /%	70.0	81.3	90.1	95.0
Before correction / $\mu\text{rad}$	56.2	65.2	78.3	91.5
After correction / $\mu\text{rad}$	32.9	41.5	50.9	59.2

能量分布(70%, 81.3%, 90.1%, 95%), 闭环校正后焦斑70%环围能量对应的发散角缩小了近一半, 95%的环围能量对应的发散角从91.5  $\mu\text{rad}$ 缩小到59.2  $\mu\text{rad}$ 。可见, 闭环校正后靶点焦斑的峰值功率和焦斑形态都有明显改善, 验证了全光路像差测量结果的有效性和全光路像差的控制能力。

另外, 在靶点放置  $2 \times 4$  排布的100  $\mu\text{m}$ 小孔阵列平面板, 采用X光小孔相机对8束激光在靶点的焦斑成像。图4(a)和(b)分别为全光路像差控制前

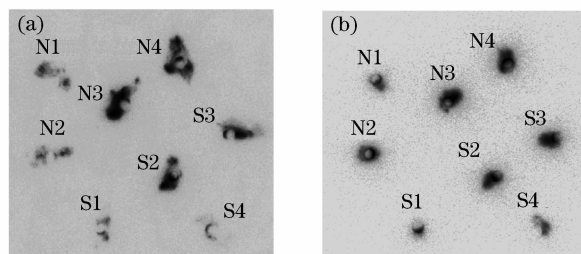


图4 (a) AO开环时8束激光在靶点的焦斑分布; (b) AO闭环时8束激光在靶点的焦斑分布

Fig.4 Focal spots without correction (a) and with correction (b)

后8束激光在靶点的焦斑分布。从图4可以看出, 对全光路像差闭环校正后, 8束焦斑尺寸和形状都有明显改善, 有利于打靶精度的调试, 满足了物理实

验对焦斑能量集中度的控制需求。

## 4 结 论

通过在靶点架设波前测量系统,获得了 TIL 装置 8 路激光的全光路像差,并利用两个波前传感器之间的对应关系,采用过渡的方法将靶点获得的全光路像差过渡到主放参数诊断包内的波前传感器上,从而实现了 8 束激光的快速闭环校正。通过靶点焦斑的对比测试,验证了全光路像差测量的有效性,95% 环围能量对应的发散角从 100  $\mu\text{rad}$  降低到 60  $\mu\text{rad}$ ,满足了物理实验对焦斑能量集中度的控制要求。

**致谢** 本实验得到了中国科学院光电技术研究所李恩德等相关技术人员的支持和帮助,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 M. L. Spaeth, K. R. Manes, C. C. Widmayer *et al.*. National Ignition Facility wavefront requirements and optical architecture [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12):2854~2865
- 2 Y. D. Zhang, Z. P. Yang, H. F. Duan *et al.*. Characteristics of wavefront aberration in the single beam principle prototype of the next generation ICF system [C]. *SPIE*, 2002, **4825**:249~256
- 3 Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin *et al.*. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):895~899  
金 钢,刘顺发,李树民等. 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响[J]. 中国激光, 2002, **A29**(10):895~899
- 4 Yang Zhengang, Chen Haiqing, Li Jie *et al.*. Lasers aberration compensation using an intra-cavity adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12):2205~2208  
杨振刚,陈海清,李 捷等. 内腔自适应光学系统校正激光器畸变[J]. 光学学报, 2007, **27**(12):2205~2208
- 5 J. T. Salmon, E. S. Bliss, J. L. Byrd *et al.*. An adaptive optics system for solid-state laser systems used in inertial confinement fusion [C]. *SPIE*, 1997, **2633**:105~113
- 6 Wang Fang, Zhu Qihua, Jiang Dongbin *et al.*. Optimization of optical design of the master amplifier in multi-pass off-axis amplification system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10):5277~5282  
王 方,朱启华,蒋东宾等. 多程放大系统主放大级光学优化设计[J]. 物理学报, 2006, **55**(10):5277~5282
- 7 R. A. Zacharias, N. R. Beer, E. S. Bliss *et al.*. Alignment and wavefront control system of national ignition facility [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12):2873~2884
- 8 R. A. Zacharias, E. S. Bliss, S. S. Winters *et al.*. Wavefront control of high-power laser beam in the national ignition facility [C]. *SPIE*, 2000, **3889**:332~343
- 9 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei *et al.*. Application of adaptive optics technique in TIL facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(Suppl. 1):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 1):102~106