

高功率激光驱动器波前残余像差研究

郭爱林 朱海东* 唐仕旺 谢兴龙 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 准确预校正大能量激光发射时的动态波前像差是高功率激光驱动器自适应光学波前质量控制的关键。基于闭环预校正实验数据,利用神光 II 升级装置波前传输模型计算动态波前预校正偏差,获得更为准确的变形镜校正面形;再利用基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法修正变形镜的驱动电压,可提高动态波前预校正的准确性,降低激光装置大能量发射实验时输出光束的波前残余像差。在神光 II 升级激光装置上采用该技术获得了比传统的基于闭环预校正的波前控制技术更好的波前控制效果,使得大能量激光发射实验中光束顺利过孔,保障了装置的安全运行,并且明显改善了输出光束的波前质量,提高了大能量激光发射实验的成功率。

关键词 激光光学;高功率激光;自适应光学;残余波前像差

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0814002

Residual Wavefront Aberration of High-Power Laser Facility

Guo Ailin Zhu Haidong Tang Shiwang Xie Xinglong Zhu Jianqiang

(Joint Laboratory on High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The core of adaptive optics wavefront control of the high-power laser facility is to pre-correct the dynamic wavefront aberration of the high-energy laser accurately. Based on the experimental data of closed-loop pre-correction and using the wavefront propagation model of the SG-II updated laser facility, the deviation of the pre-corrected dynamic wavefront aberration is calculated, and the more accurate deformed-shape of the deformable mirror is obtained. Then using the deformable mirror control algorithm that based on the phase correction at the actuator position to correct the driving voltage of the deformable mirror, so that the accuracy of the pre-corrected dynamic wavefront aberration is improved, and the residual wavefront aberration of the output high-energy laser shot is reduced. Comparing with the traditional technology that based on the closed-loop pre-correction of the dynamic wavefront aberration, this technology has a better control effect in the SG-II updated laser facility, so that the high-energy laser beam can pass through the filtering hole smoothly, the safety of the laser facility is ensured, the wavefront quality of the output laser is improved obviously, and the success rate of the high-energy laser emission experiment is increased.

Key words laser optics; high-power laser; adaptive optics; residual wavefront aberration

OCIS codes 050.5080; 140.3460; 350.5500

1 引言

用于惯性约束核聚变实验研究的高功率激光驱动器具有光学元件多、光束口径大、光程长和能量高的特点,使得激光束在传输与放大过程中积累较大的波前像差。受震动、气流以及热梯度变化等因素的影响,波前像差还具有一定的抖动性。波前像差不仅降低激光束的传输与聚焦性能,在大能量激光

发射时还危及器件的安全。因此,光束波前质量控制成为高功率激光驱动器研究的重要内容^[1]。

早期的激光驱动器基本采用波前像差被动控制技术,包括单元光学件波前质量检测、激光链路精密光学装校、空间滤波器高频滤波以及激光放大器散热管理等。随着高功率激光驱动器规模的发展,被动控制技术已经无法满足波前质量控制的要求,需

收稿日期: 2013-01-15; 收到修改稿日期: 2013-04-17

作者简介: 郭爱林(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事高功率激光驱动器波前质量控制和超短脉冲激光等方面的研究。E-mail: gall47@163.com

* 通信联系人。E-mail: hdzhu@siom.ac.cn

要在被动控制的基础上引入自适应光学波前主动控制技术^[2-3]。

为便于波前像差的控制,将光束波前像差分为激光链路静态波前像差和激光放大器动态波前像差^[4]。激光放大器动态波前像差按发生先后顺序又分为瞬态像差和热恢复像差。瞬态像差是大能量激光发射期间不均匀抽运和非线性效应等因素造成的像差,热恢复像差是激光发射后钕玻璃形变和热梯度等因素造成的像差。鉴于高功率激光驱动器大能量激光的单次发射工作模式,可将热恢复像差看作后续发次激光的积累静态像差,因此,动态波前像差一般特指激光发射时的瞬态像差。

理论和实验表明,动态像差通常比激光链路静态波前像差大,使得动态像差的校正成为波前质量控制的主要内容^[5-6]。以神光 II 升级激光装置为例,由于激光束在主放大器中需要经历 42 片次钕玻璃放大,使得激光发射时光束动态波前像差较大,造成 500J 能量的激光发射实验容易出现滤波器堵孔现象,而更高的能量发射将严重威胁器件的安全。该实验现象表明,动态波前像差成为限制激光驱动器输出能量的关键因素,必须利用自适应光学系统对其进行有效控制,才能完成神光 II 升级装置单路 5000 J 能量安全输出的工程实验阶段目标。

传统的应用于天文观测等领域的自适应光学系统是基于闭环控制的工作方式,将其应用到高功率激光驱动器中,可在小能量重复频率或连续激光的引导下完成激光链路静态波前像差的闭环校正。但是,因为高功率激光驱动器大能量激光的单次发射工作模式,自适应光学系统无法对动态波前像差直接进行闭环校正,所以普遍采用闭环预校正技术,即大能量激光发射前激光放大器处于关闭状态,自适应光学系统在小能量激光静态传输的引导下,基于历史动态波前数据进行闭环控制,对待发射大能量激光动态波前像差进行预校正^[4,7]。

在神光 II 升级激光装置的工程实验中,采用闭环预校正技术能明显改善大能量发射时输出激光的波前质量,但波前残余像差偏大且具有不确定性,无法保障大能量激光发射时装置的安全,其主要原因是激光装置输出波前随机抖动和动态波前闭环预校正偏差。对于自适应光学波前控制系统而言,波前随机抖动属于不可控因素,只能通过提高波前预校正的准确性来降低波前残余像差。然而,受波前随机抖动的影响,无法直接通过输出激光的波前残余像差来判断动态波前预校正偏差对残余像差的贡献,进

而无法指导自适应光学系统提高波前预校正的准确性。为了解决该问题,本文利用神光 II 升级装置波前传输计算模型和基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法^[5,8],首先计算动态波前闭环预校正的理论偏差,并与实际波前残余像差进行相似性对比,判断动态波前闭环预校正偏差对残余像差的贡献;然后在此基础上提出非闭环控制动态波前预校正技术修正变形镜校正面形,提高动态波前预校正的准确性,降低大能量激光发射时输出光束波前残余像差。在神光 II 升级工程中,利用该波前控制技术获得了比传统的闭环预校正技术更好的实验效果,为实现该装置单路 5000 J 能量安全输出的阶段目标提供了关键的技术保障。

2 波前抖动致残余像差

神光 II 升级激光装置光路结构复杂且光程长达 300 多米,易受气流、震动及热梯度变化等因素的影响而造成光束波前像差抖动,不仅给波前像差的准确测量和自适应光学闭环控制带来不利影响,造成较大的波前残余像差,还使大能量激光发射时光束波前传输质量具有一定的不确定性而危及器件的安全。

为了提高波前测量的准确性,提出在保持实验环境和激光装置的状态不变的条件下,利用 1 Hz 小能量重复频率激光束贯穿整个激光链路,输出光束经采样和缩束光路注入到哈特曼波前传感器中完成焦斑阵列图像的采集,然后基于微透镜焦斑阵列平均值重构光束的波前像差。图 1(a)为利用 10 min 内采集的 600 幅焦斑阵列图像计算神光 II 升级激光装置南 4 路的静态输出波前像差,波前像差峰谷(PV)值 d_{PV} 和均方根(RMS)值 a_{RMS} 分别为 4.708 λ 和 0.569 λ ,其中 λ 是激光波长,为 1.053 μm 。

为了评估波前像差抖动对光束波前残余像差的贡献,从测得的静态波前像差中剔除图 1(a)所示的静态波前像差,其计算结果即为自适应光学系统完全校正激光系统波前像差后因为波前像差抖动而造成的输出光束波前残余像差。图 1(b)~(d)为从上述 600 个实验数据中随机选取的 3 个数据计算的像差抖动致波前残余像差的形态,图 2 为像差抖动致波前残余像差的 PV 值,可见像差抖动致波前残余像差在形态和数值上均呈不可预知的随机抖动状态,因此对于自适应光学波前控制系统而言属于不可控波前像差成分。

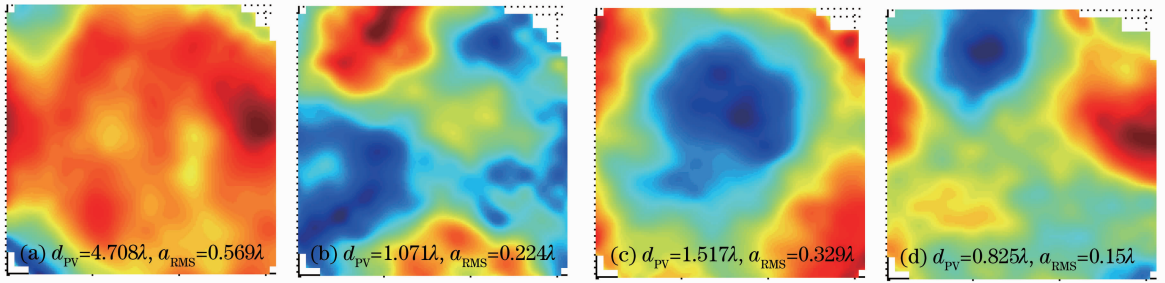


图1 (a)静态波前像差及(b)~(d)随机抖动致波前残余像差

Fig. 1 (a) Static wavefront aberration and (b)~(d) residual wavefront aberrations from random deformation

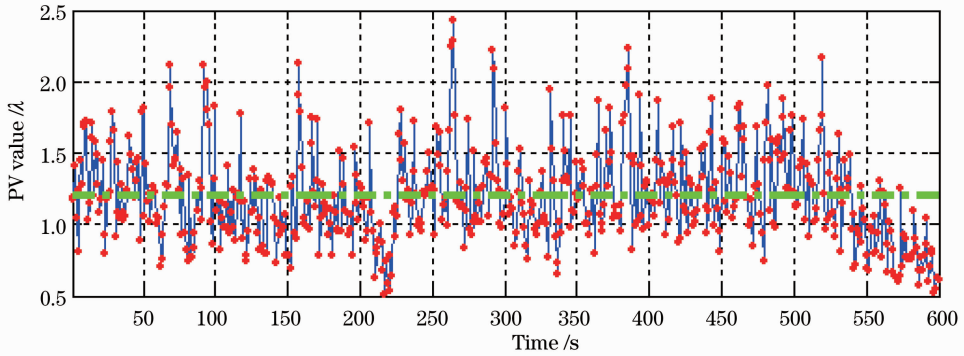


图2 随机抖动致波前残余像差的PV值

Fig. 2 PV value of the residual wavefront aberration from random deformation

总而言之,即使自适应光学系统完全校正激光系统的波前像差,受波前像差随机抖动的影响,其输出光束波前残余像差的PV值仍在 $0.5\lambda \sim 2.5\lambda$ 之间随机跳动,且波面形态也随机变化。

3 动态波前闭环预校正偏差

理论分析和实验测试结果显示,神光II升级激光装置的变形镜对前15项泽尼克多项式所定义的波前像差模式具有良好的面形拟合能力,满足激光装置波前质量控制的要求^[8]。然而,不同于天文观测等自适应光学技术的传统应用领域,神光II升级装置的大能量激光单次发射工作模式、复杂的光学结构和波前像差抖动等因素使得基于闭环控制的自适应光学系统难以获得大能量激光发射时变形镜准确的校正面形,使得动态波前预校正存在偏差,造成输出光束波前残余像差偏大。

根据工程实验和理论分析,引起神光II升级装置大能量激光发射动态波前闭环预校正偏差的主要原因包括如下几点:

1) 标定变形镜与哈特曼波前传感器间准确的传递函数是进行自适应光学闭环控制的基础^[9-10]。然而,为了优化高功率激光驱动器光学链路中波前

像差的分布与传输,变形镜与哈特曼波前传感器之间存在结构较为复杂的光路^[5]。该光路波前像差较大且不稳定,使得变形镜与哈特曼波前传感器间传递函数的标定存在较大的误差,甚至在推拉变形镜驱动器时会出现滤波器堵孔而造成传递函数信息缺失的现象。

2) 动态波前闭环预校正以历史动态波前的共轭像差作为闭环控制的目标^[4]。然而,放大器热积累效应使得激光发次间的动态波前像差存在一定差异^[11-12]。此外,波前像差的随机抖动对获取准确的动态波前像差数据带来不利影响,从而造成动态波前预校正偏差。

3) 波前残余像差小于闭环收敛条件是自适应光学系统完成并结束波前闭环控制的判据^[9]。但是在工程实验中波前像差随机抖动的幅度比闭环收敛条件更大,不仅造成闭环控制算法无法准确判断波前控制的效果是否满足要求,还使得闭环控制时变形镜的驱动面形跟随光束波面而不断变化。

4) 输出光束近场强度调制使得光束边缘等光强偏弱的区域所对应的微透镜焦斑阵列缺光,或在闭环控制时忽隐忽现成为奇异波前数据,使相应驱动器所加载的电压剧烈波动,不仅造成较大的波前残余像差,还会产生较大的驱动力而损坏变形镜。

5) 动态波前像差预校正是在小能量重复频率激光静态传输的引导下完成闭环控制的。然而,理论和实验表明,大能量激光发射时光路中波前像差的传输和分布与小能量激光闭环预校正时的静态传输具有较大的差异^[5],从而降低了这种基于准闭环工作方式对动态波前预校正的准确性。

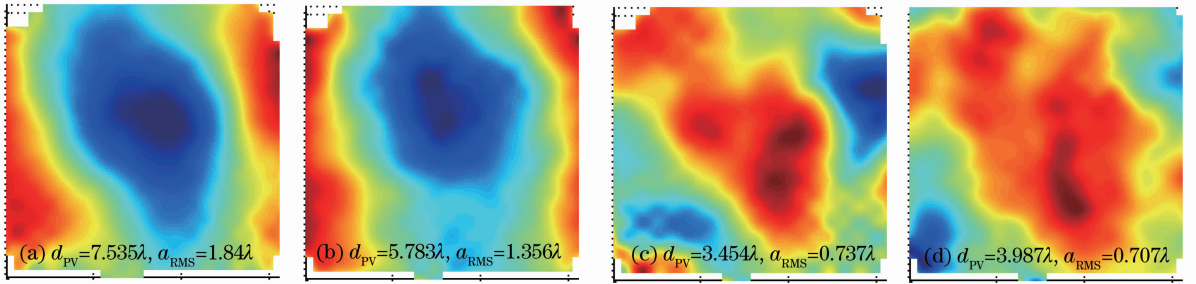


图 3 (a) 预校正动态波前;(b)实际动态波前;(c)动态波前预校正偏差;(d)实测波前残余像差

Fig. 3 (a) Pre-corrected dynamic wavefront; (b) actual dynamic wavefront; (c) difference between pre-corrected and actual dynamic wavefront; (d) actual residual wavefront aberration

图 3(a)和(b)分别为利用动态波前闭环预校正技术开展大能量激光发射实验时预校正动态波前像差的理论计算值和实测动态波前像差,图 3(c)为两者的偏差,即动态波前预校正偏差,图 3(d)为输出光束实测波前残余像差。对比图 3(c)和(d)可见,波前残余像差与动态波前预校正偏差在形态上具有明显的相似性,即动态波前预校正偏差对波前残余像差的贡献较大,因此可以通过修正变形镜的驱动面形提高动态波前预校正的准确性,降低输出光束波前残余像差。

4 变形镜波前预校正面形修正

自适应光学波前控制的关键在于确定大能量激光发射时变形镜准确的校正面形,由于存在前述所列的不利因素,在高功率激光驱动器中采用传统的基于闭环控制的自适应光学技术进行波前质量控制时难以获得变形镜准确的校正面形,使得大能量激光发射实验时输出光束波前残余像差偏大。

为了解决该问题,提出利用自主开发的基于衍射算法的神光 II 升级装置波前传输模型和基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法^[5,8],结合大能量激光波前校正实验数据,计算更为准确的变形镜校正面形和驱动电压。具体过程如下所述:

1) 利用传统的自适应光学闭环预校正技术生成变形镜电压控制数据,变形镜加载该电压数据后进行激光发射实验,测量激光放大器动态波前像差

尽管引起动态波前闭环预校正偏差的因素较多且复杂,但自适应光学系统完成闭环预校正操作后,变形镜的驱动面形是确定的。利用神光 II 升级装置的波前传输模型计算预校正动态波前像差的理论值,并与大能量激光发射实测动态波前像差比较差异,即可计算出动态波前预校正偏差,如图 3 所示。

和输出激光残余波前像差的实验数据,分别如图 3(b)和(d)所示。

2) 根据变形镜电压控制数据计算变形镜闭环预校正面形,将其代入神光 II 升级装置波前传输模型计算预校正动态波前像差的理论值,如图 3(a)所示。

3) 计算预校正动态波前和实际动态波前像差的偏差,如图 3(c)所示。

4) 为了排除波前随机抖动对波前残余像差的干扰,判断动态波前预校正偏差对残余像差的贡献,对比动态波前预校正偏差和残余像差在形态上的相似性。如果相似,则认为预校正偏差对残余像差的贡献较大,需要修正变形镜校正面形,提高波前预校正准确性。

5) 基于动态波前预校正偏差,利用神光 II 升级装置波前传输模型计算变形镜的修正面形,如图 4(a)所示。

6) 利用基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法,解耦各驱动器的修正电压系数,再与原先闭环预校正电压相加,从而获得更为准确的变形镜控制电压,如图 4(d)所示。

基于该技术开展了多次大能量激光发射实验,图 4(c)为变形镜加载修正后的驱动电压时大能量激光发射输出光束的残余像差典型值,对比图 3(d)可见输出光束的波前质量得到明显的改善。

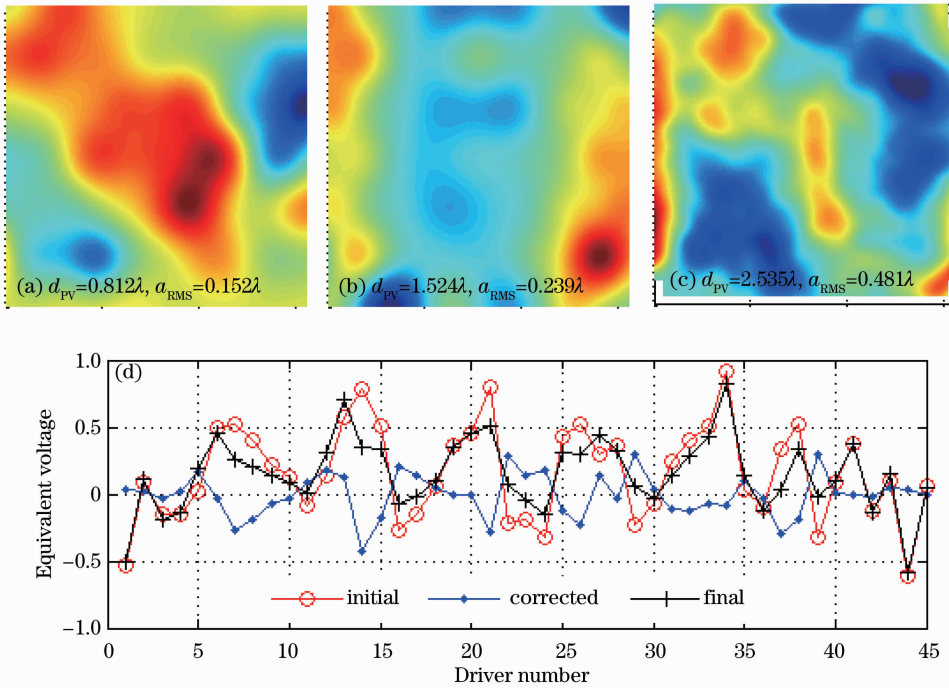


图4 (a)变形镜修正面形;(b)修正后校正面形;(c)修正后波前残余像差;(d)变形镜初始、修正和最终驱动电压系数

Fig. 4 (a) Corrected and (b) final shape of the deformable mirror; (c) residual wavefront aberration of high energy laser shot after correction; (d) initial, corrected and final equivalent voltage of the deformable mirror

5 讨 论

为了避免千焦耳以上大能量激光发射时出现空间滤波器堵孔的现象,确保神光 II 升级装置的安全运行,事实上在工程实验中均未直接采用闭环预校正技术所产生的电压数据进行大能量激光发射。

在早期的实验中通过人为地修正大电压的方法避免了空间滤波器堵孔,但是这种修正方法主观随意性大,无法同时兼顾滤波器过孔和输出光束的波前质量。然而,作为用于惯性约束核聚变实验研究的激光驱动器,不仅要求神光 II 升级激光装置能安全地输出较高的激光能量,还要求输出光束具有较高的波前质量,因此根据具体的实验现象和已有的理论和技术积累^[5,8],提出了基于动态波前预校正偏差修正变形镜校正面形的方法,提高了动态波前预校正的准确性,可以同时兼顾激光束顺利过孔和输出光束的波前质量,从而提高装置大能量发射的成功率,为神光 II 升级装置单路 5000 J 能量安全输出和三倍频实验的波前质量控制提供了关键的技术保障。

在实验中,尽管修正了动态波前闭环预校正偏差,受波前随机抖动和放大器热积累等因素的影响,输出激光波前残余像差仍偏大,其 PV 值基本在

$2\lambda\sim 3\lambda$ 之间波动,虽然能保证大能量激光发射时光束顺利过孔,但输出激光的聚焦能力仍难以得到保证。因此,为了提升激光装置输出光束的波前质量,在后期的工作中需要降低波前像差随机抖动的幅度,并获取更为准确的放大器动态像差数据。

6 结 论

光束波前像差随机抖动和动态波前闭环预校正偏差是高功率激光驱动器输出光束波前残余像差的主要来源。基于神光 II 升级激光装置波前传输模型和动态像差实验数据计算出动态波前闭环预校正偏差,并与输出光束残余波前像差对比形态上的相似性,从而判断出预校正偏差对残余像差的贡献。利用神光 II 升级激光装置波前传输模型和动态波前闭环预校正偏差计算出更为准确的变形镜校正面形,然后利用基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法获得更为准确的变形镜电压控制数据。经过多次大能量激光发射实验证明,该技术能有效降低输出光束波前残余像差,确保光束顺利过孔,提高神光 II 升级装置大能量激光发射实验的成功率。

致谢 感谢中国科学院成都光电技术研究所自适应

光学重点实验室为神光 II 升级激光装置研制自适应光学系统,感谢杨泽平、李恩德、凡木文、施宁平、王飞等技术专家在系统研究和现场调试等方面给予的支持和帮助。

参 考 文 献

- 1 M L Spaeth, K R Manes, C C Widmayer, *et al.*. The National Ignition Facility wavefront requirements and optical architecture [C]. SPIE, 2004, 5341: 25–42.
- 2 Jiang Wenhan, Yang Zeping, Guan Chunlin, *et al.*. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility [J]. Chinese J 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核聚变领域应用的新进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1625–1634.
- 3 Feng Jing, Wanjun Dai, Dongxia Hu, *et al.*. Beam wavefront correction scheme for application in a multi-pass amplifier system [C]. CLEO Pacific Rim 2011, Sydney Australia: 797–799.
- 4 Zeping Yang, Ende Li, Haiying Wang, *et al.*. Adaptive optical system for a large-aperture Nd:glass laser for ICF [C]. SPIE, 2004, 5639: 21–27.
- 5 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zeping, *et al.*. Wavefront propagation modeling and verification of the SG-II updated laser facility [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2):0214001.
郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 神光 II 升级装置波前传输计算模型与验证[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0214001.
- 6 D Homoelle, Mark W Bowers, Tracy Budge, *et al.*. Measurement of repeatability of prompt flashlamp-induced wavefront aberration on beamlines at the National Ignition Facility [J]. Appl Opt, 2011, 50 (22): 4382–4388.
- 7 R A Zacharias, N R Beer, E S Bliss, *et al.*. Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility [J]. Opt Engng, 2004, 43(12): 2873–2884.
- 8 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zeping, *et al.*. Deformable mirror control algorithm based on the phase correction at the actuator position [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3):0311001.
郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0311001.
- 9 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.
- 10 Richard Zacharias, Erlan Bliss, Mark Feldman, *et al.*. The National Ignition Facility wavefront control system [C]. SPIE, 1999, 3492: 678–692.
- 11 S Sutton, C Marshall, C Petty, *et al.*. Thermal recovery of NIF amplifiers [C]. SPIE, 1997, 3047: 560–568.
- 12 Ph Arnoux, G Le Touze, J P Caltagirone, *et al.*. Thermal recovery of LMJ amplifiers [C]. SPIE, 1999, 3492: 660–664.

栏目编辑: 张 腾