

四程放大高功率激光驱动器动态波前模拟与实验研究

唐仕旺^{1,2} 朱海东^{1,2} 郭爱林¹ 谢兴龙¹ 朱健强¹ 马伟新³

¹ 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
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 高功率激光驱动器动态波前特征及其规律是激光驱动器光束波前质量控制关键研究内容之一。以神光 II 四程放大高功率激光驱动器为研究平台, 使用 ANSYS 和 Matlab 对激光驱动器瞬时动态波前进行了模拟计算, 并利用哈特曼波前分析仪对驱动器氙灯抽运引入的瞬时动态像差和热恢复像差进行了实验研究, 得到其时空特性和变化规律。理论模拟和实验结果具有一致性, 单片片状放大器动态像差峰谷 (PV) 值约为 0.12λ (波长 $\lambda = 1053$ nm), 驱动器总体瞬时动态像差 PV 值约为 5λ , 呈“瓦片”形态。模拟计算和实验分析为神光 II 四程放大高功率激光驱动器光束波前质量控制、激光发射顺利通过空间滤波器和片状放大器抽运均匀性优化等提供了重要的参考数据, 提升了输出光束远场焦斑能量集中度, 提高了驱动器激光发射的成功率和运行效率。

关键词 激光光学; 动态波前; 激光驱动器; 四程放大; 波前补偿; 热恢复过程

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0702005

Study of Simulation and Experiment of the Prompt Pump-Induced Wavefront of the Four-Pass Amplification High Power Laser Facility

Tang Shiwang^{1,2} Zhu Haidong^{1,2} Guo Ailin¹ Xie Xinglong¹
Zhu Jianqiang¹ Ma Weixin³

¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract The prompt pump-induced wavefront characteristic of high power laser facility is undertaken to address an important aspect of the wavefront control system for the high power laser facility. Based on the ShenGuang II four-pass amplification high power laser facility (SG-II-FAF), numerical simulation is conducted on the prompt pump-induced wavefront distortion through ANSYS and Matlab. In order to obtain the space-time characteristics and variation features, the Hartmann wavefront analyzer is employed to conduct experiments on prompt pump-induced wavefront distortion and thermal wavefront recovery aberration after xenon lamp pumping. The numerical simulation results agree well with experimental results. The prompt pump-induced wavefront distortion of single-slab-amplifier is about 0.12λ (wavelength $\lambda = 1053$ nm) of peak-to-valley (PV), and the whole optical wavefront of the SG-II-FAF is about 5λ of PV with different laser beams, whose shape looks like a “saddle”. Simulations and experiments provide important data for the wavefront control system of SG-II-FAF, emission laser passing through the space filters successfully and pumping uniformity of slab Nd: glass amplifier. As a result, the far-field focus spot energy concentration of the laser beam is improved, meanwhile the success rate and the working efficiency of the SG-II-FAF operational experiment are increased.

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家 863 计划(2012AA8044010)、高功率激光物理联合实验室研究发展基金

作者简介: 唐仕旺(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率激光动态波前方面的研究。E-mail: swtang@foxmail.com

导师简介: 朱海东(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事高功率激光光束质量控制方面的研究。

E-mail: hdzhu@siom.ac.cn (通信联系人)

Key words laser optics; prompt pump-induced wavefront; laser facility; four-pass amplification; wavefront compensation; thermal recovery wavefront

OCIS codes 050.5080; 080.1010; 140.3460

1 引 言

高功率激光驱动器具有口径大、传输光路长和输出波前畸变较大等特点,光束波前质量关系到激光装置的安全运行和物理实验能否成功,因此光束波前质量控制是高功率激光装置最基本的研究内容之一^[1]。大口径高功率激光驱动器光束波前像差可分为静态像差和动态像差,静态像差源于光学元件材料不均匀性、光学加工和夹持应力等因素;动态像差则由激光驱动器瞬态和热恢复过程中放大器的热梯度不均匀性引起^[2-3]。通常大口径钽玻璃放大高功率激光驱动器中静态像差约占总像差的30%,空间频率覆盖整个频谱,其高频成份可利用空间滤波器截止;动态像差几乎占激光驱动器总像差的70%,以低频像差为主,相对于静态像差,它对激光驱动器的输出光束质量、远场焦斑特征及系统安全运行的影响更严重^[4]。

通常大口径高功率激光驱动器以低重复频率($4\sim 6\text{ h}^{-1}$)千焦耳输出的运行方式为物理实验提供纳秒激光脉冲。激光驱动器的输出静态像差可利用波前传感器在主激光百微焦耳1 Hz注入条件下进行实时采集,但全系统千焦耳发射时放大器带来的瞬时动态像差只有在激光发射瞬间才可测量。因此驱动器运行过程中,无法利用传统的自适应光学实时反馈波前补偿技术校正其输出像差,往往依据激光驱动器固有的动态像差特征,采用波前预校正技术提升驱动器输出光束波前质量^[1]。因此准确分析和获取激光驱动器瞬时动态像差及其热恢复规律已成为高功率激光装置光束波前控制中的一项核心研究内容。

不同的高功率激光驱动器在整体构型和放大器等方面均不具有一致性,因而其动态像差的时空特征也各具特点。国外高功率激光驱动器动态像差的研究起步较早,以美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)为代表,LLNL从20世纪70年代起就对动态波前进行了大量深入细致的研究,并在将这一系列成果应用到国家点火装置(NIF)上^[5-6];国内对动态波前的研究集中在神光系列高功率激光驱动器(如神光Ⅱ、神光Ⅲ及其原型装置)上,得到了一系列模拟分析和实验结果^[7-11]。神光Ⅱ四程放大高功率激光驱动器是国内目前唯一采用类NIF技

术路线的高功率激光装置,光束通过的片状放大器为42片,开展动态像差的理论分析和实验研究,对四程放大构型激光装置具有迫切性和实用性。

本文以神光Ⅱ四程放大高功率激光驱动器为研究平台,以热力学理论和热源函数为基础,利用有限元软件ANSYS和Matlab模拟计算了神光Ⅱ四程放大高功率激光驱动器的瞬时动态像差。利用哈特曼波前分析仪采集了氙灯抽运引入的瞬时动态像差和钽玻璃热恢复像差。将研究成果应用到神光Ⅱ四程放大高功率激光驱动器中,为自适应光学光束波前补偿的技术研究和片状放大器抽运均匀性的优化改进提供了有价值的参考数据,有效提升了激光驱动器输出光束质量,提高了装置运行的安全性和稳定性。

2 激光驱动器构型

神光Ⅱ四程放大高功率激光驱动器采用和国家点火装置(NIF)一致的主放大器结构,如图1所示,该结构具有空间紧凑、能量提取效率高和经济节约等优点^[2]。图1中PreA为预放大器,TSF为传输空间滤波器,TL1与TL2为TSF透镜,PA为助推放大器,RM1和RM2为 45° 反射镜,P1和P2为偏振片,CM1为腔反射镜,PEPC为等离子体电光开关,CSF为腔空间滤波器,CL1和CL2为CSF透镜,CA为腔放大器,DM为变形镜。PA由5片片状放大器构成,CA由8片片状放大器构成,片状放大器中钽玻璃片成布儒斯特角斜放置,激光发射过程中光束2次通过PA,4次通过CA,主放大器引入的动态像差为光束通过42片片状放大器的波前畸变的总和。PEPC和偏振片P1控制光束进入或离开CA,从而实现四程放大。本装置使用中国科学院成都光电所研制的大口径DM作为CA反射腔镜对驱动器基频输出低频像差进行有效波前补偿^[1,12],光束口径为 $290\text{ mm}\times 290\text{ mm}$,DM驱动器行程为 $3\text{ }\mu\text{m}$,变形镜波前校正驱动器单元和方形光束之间存在确定的校正匹配关系^[12],能够有效校正三阶以下(含三阶)的低频像差。

本文提出了动态波前的模拟计算方法,利用ANSYS和Matlab模拟计算出光程差,利用方域泽尼克多项式进行拟合得到动态波前,利用哈特曼波前分析仪对神光Ⅱ四程放大高功率激光驱动器进行

在线波前的测量,哈特曼传感器的入射光束口径为 $5.5\text{ mm} \times 5.5\text{ mm}$,离焦像差测量动态范围大于等于 $16\text{ }\mu\text{m}$,测量精度达到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,采样频率可选择为 1 Hz 和单次(同步信号触发)两种工作方式,测量

光束经过衰减系统和两级缩束系统后,在哈特曼传感器中聚焦成 22×22 光斑阵列,根据哈特曼传感器中子孔径单元阵列聚焦光斑的偏移量进行波前重构得到光束波前。

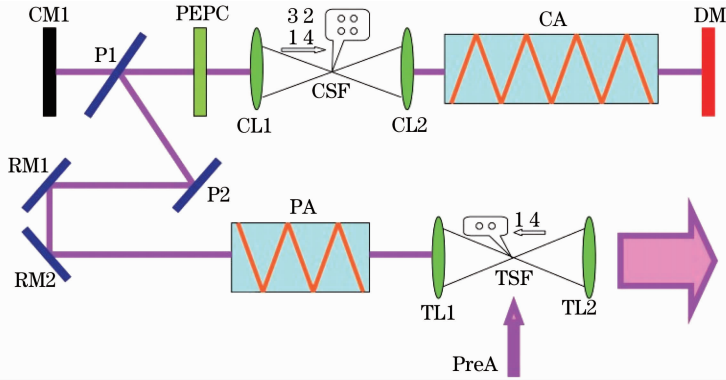


图1 四程放大高功率激光驱动器主放大器

Fig. 1 Main amplifier of four-pass amplification high power laser facility

3 模拟分析

神光II四程放大高功率激光驱动器的放大器由片状放大器组合构成,片状放大器中钕玻璃片与光束传输方向成布儒斯特角放置,两侧为氙灯抽运阵列。氙灯抽运时,一部分钕玻璃激光介质吸收的氙灯抽运光转化为热能,抽运过程的非均匀性导致片状放大器热膨胀并发生形变,弯曲成“S”型,如图2所示。

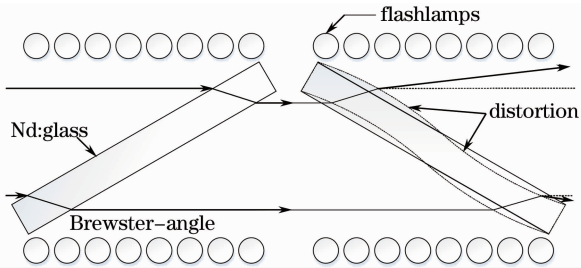


图2 钕玻璃放大器和不均匀抽运导致的应力形变示意图

Fig. 2 Schematic of Nd:glass amplifier and distortion caused by uneven pumping

依据热力学理论,以热源函数 $Q(x, y, z, t)$ 为基础,利用有限元软件 ANSYS 分析计算出片状放大器的温度 $T(x, y, z)$ 、应力 $\sigma(x, y, z)$ 和形变 $\Delta L(x, y, z)$,利用 Matlab 计算折射率 $n(x, y, z)$ 和光程差(OPD), S_0 为初始长度,最后用方域泽尼克多项式拟合得到片状放大器瞬时动态波前 $w(x, y)$,详细流程图如图3所示。

3.1 热力学有限元分析

氙灯抽运不均匀性引起的片状放大器的热功率沉积分布是一个时间和空间的函数,定义热功率沉积分布为一个可分离变量的内热源函数,表示为^[10]

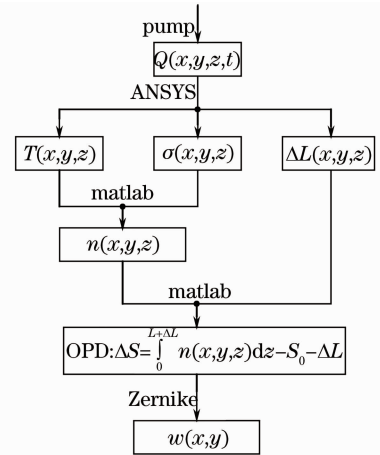


图3 模拟计算流程图

Fig. 3 Flow chat of simulation calculation

$$Q(x, y, z, t) =$$

$$AS(x)[g_0(y)f(z) + g_h(y)f(h-z)]u(t), \quad (1)$$

式中 x 表示垂直方向坐标, y 表示水平方向坐标, z 表示厚度方向(光束传输方向)坐标, t 为时间变量, A 为乘积因子, $S(x)$ 为垂直方向抽运变化, $g_0(y)$ 为 $z=0$ 处水平方向抽运变化, $g_h(y)$ 为 $z=h$ 处水平方向抽运变化, h 为片状放大器厚度, $f(z)$ 为 z 方向抽运能量分布, $u(t)$ 为抽运脉冲时间特性^[10]。由于瞬时动态波前的时间尺度小(百微秒量级),将变量 t 分离出去,建立瞬时动态波前三维模型。使用 ANSYS 先将瞬时动态波前三维模型划分成 $41 \times 131 \times 31$ 网格,并将(1)式的热源函数作为边界条件加载到此三维模型中,然后求解计算得到片状放大器的温度、应力和形变,作为后续模拟计算的输入数据。

3.2 光程差和波前拟合

将钕玻璃介质离散化,进行光束传输方向上的光线追迹,如图 4 所示。

将每段离散化的介质视为一个整体单元,计算出其带来的畸变量,各段造成的畸变之和就是光束通过介质的总畸变^[13]。钕玻璃第 i 单元的折射率变化量 Δn_i 与其应力、温度的关系可表示为

$$\Delta n_i = \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_{\epsilon=0} \Delta T_i - (\sigma_{rr} B_{\parallel} + \sigma_{\theta\theta} B_{\perp} + \sigma_{zz} B_{\perp}) - n_0 \delta \left(\frac{2p}{V_0} + \frac{q}{V_0} \right) \Delta T_i, \quad (2)$$

式中 n 为折射率, T 为温度, ϵ 为应变, ΔT_i 为第 i 单元的温度变化量, σ_{rr} 、 $\sigma_{\theta\theta}$ 、 σ_{zz} 分别表示径向、角向和传播方向的应力, B_{\parallel} 和 B_{\perp} 分别为应力光学系数的平行和垂直方向的正交分量, δ 为膨胀系数, p 、 q 为与 B 相关的材料参数^[13], V_0 为光束传播速度。光程差 ΔS 的离散介质计算公式可表示为

$$\Delta S = \int_0^{L+\Delta L} n(x, y, z) dz - S_0 - \Delta L = \sum_{i=1}^M n_i(x, y, z) (L_i + \Delta L_i) - n_0 \sum_{i=1}^M L_i - \sum_{i=1}^M \Delta L_i, \quad (3)$$

式中 L 为介质长度, ΔL 为介质形变, M 为介质在 z 方向的网格划分数, L_i 和 ΔL_i 为第 i 单元的初始长度和介质形变量, n_0 为初始折射率^[13]。波前拟合公式可表示为

$$w(x, y) = \sum_{j=0}^N a_j Z_j(x, y). \quad (4)$$

式中 N 为模式数, a_j 为系数, Z_j 为方域泽尼克多项式,

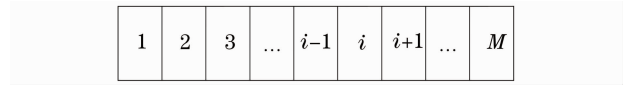


图 4 钕玻璃离散介质(z 方向)

Fig. 4 Nd:glass medium considered as the discrete form (z direction)

是标准泽尼克经过格兰斯密特正交化后得到的^[14-15]。

根据(2)式和(3)式将 ANSYS 的分析结果作为输入利用 Matlab 计算得到光程差,最后利用方域泽尼克多项式进行拟合,得到动态波前。

3.3 模拟计算结果

使用上述模拟方法计算得到片状放大器的瞬时动态波前如图 5 所示,图 5(a)为片状放大器的前后

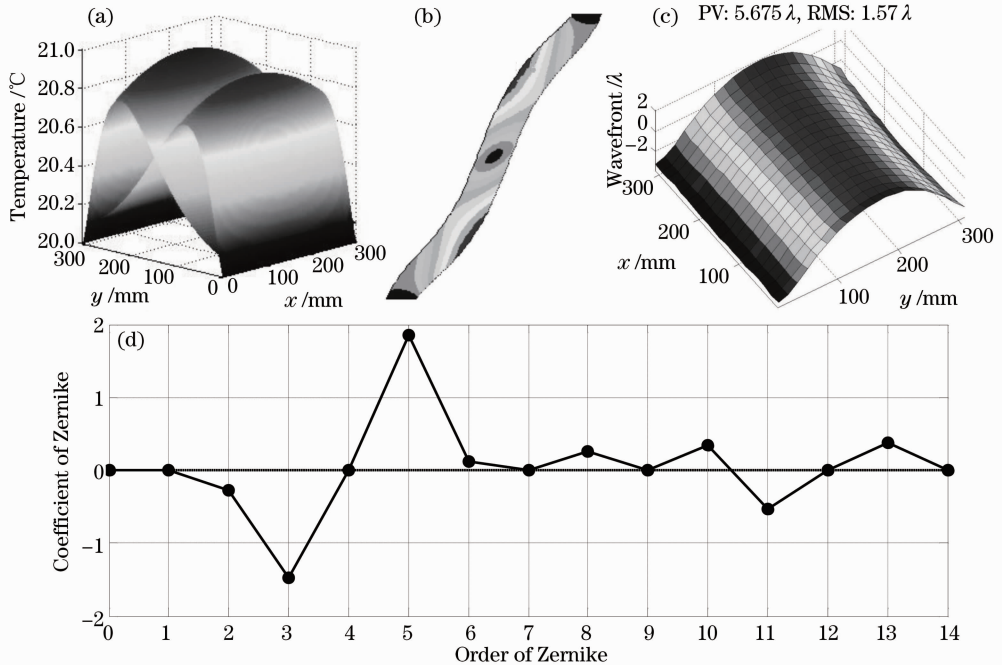


图 5 模拟的钕玻璃放大器瞬时动态波前。(a) 前后表面温度;(b) 形变;(c) 拟合波前;(d) 0~14 阶方域泽尼克多项式的系数

Fig. 5 Prompt pump-induced wavefront distortion of Nd:glass amplifier by numerical simulation. (a) Front and back surface temperature; (b) distortion; (c) fitted wavefront; (d) coefficient of Zernike polynomial

表面温度,图 5(b)为中心截面的形变,图 5(c)为拟合的瞬时动态波前,图 5(d)为对波前进行拟合的 0~14阶方域泽尼克多项式的系数。

由图 5 可知,片状放大器在激光发射时具有“S”微形变,驱动器的总体瞬时动态波前峰谷(PV)值为 5.675λ ,均方根(RMS)为 1.57λ ;瞬时动态波前整体呈“瓦片”形态,中间部分凸起,边缘部分凹陷;方域泽尼克多项式以第三阶和第五阶为主,由泽尼克多项式定义表达式可知瞬时动态波前以离焦和像散为主^[14-15]。

4 实验研究和分析

在神光 II 四程放大高功率激光驱动器开展的实验中,利用哈特曼波前分析仪采集了静态输出像差、氙灯抽运引起的瞬态像差和钨玻璃热恢复像差。

4.1 静态波前

静态波前是指神光 II 四程放大高功率激光驱动器在正常实验条件下(温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 30%、压强为 101.325 kPa)的系统固有像差。驱动器输出静态像差通常可利用波前传感器在主激光百微焦耳 1 Hz 注入条件下进行直接采集。驱动器第 4 束静态波前如图 6 所示。

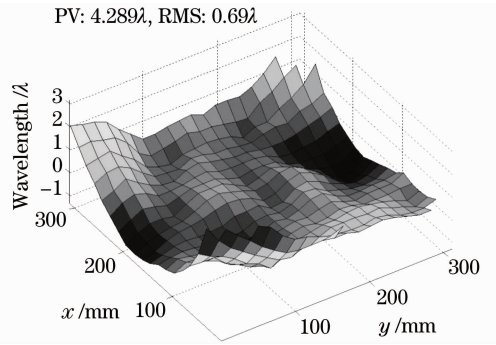


图 6 第 4 束静态波前

Fig. 6 Static wavefront of the fourth beam

4.2 瞬时动态波前

瞬时动态波前不能被直接测量,只能通过间接方式得到,表示为

$$\omega_3 = \omega_0 + \omega_2 + \Delta\omega_1, \quad (5)$$

$$\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega_1, \quad (6)$$

式中 ω_3 为激光发射瞬间的测量波前, ω_0 为系统静态波前, ω_2 为瞬时动态波前, $\Delta\omega_1$ 为变形镜加压预校正的波前增量, ω_1 为变形镜加压预校正后的测量波前。由(5)式和(6)式可得

$$\omega_2 = \omega_3 - \omega_1. \quad (7)$$

根据(7)式则可间接计算得到瞬时动态波前。

驱动器第 4 束 5000 J 能量发次($5000\text{ J}/3\text{ ns}$)的输出波前如图 7 所示。

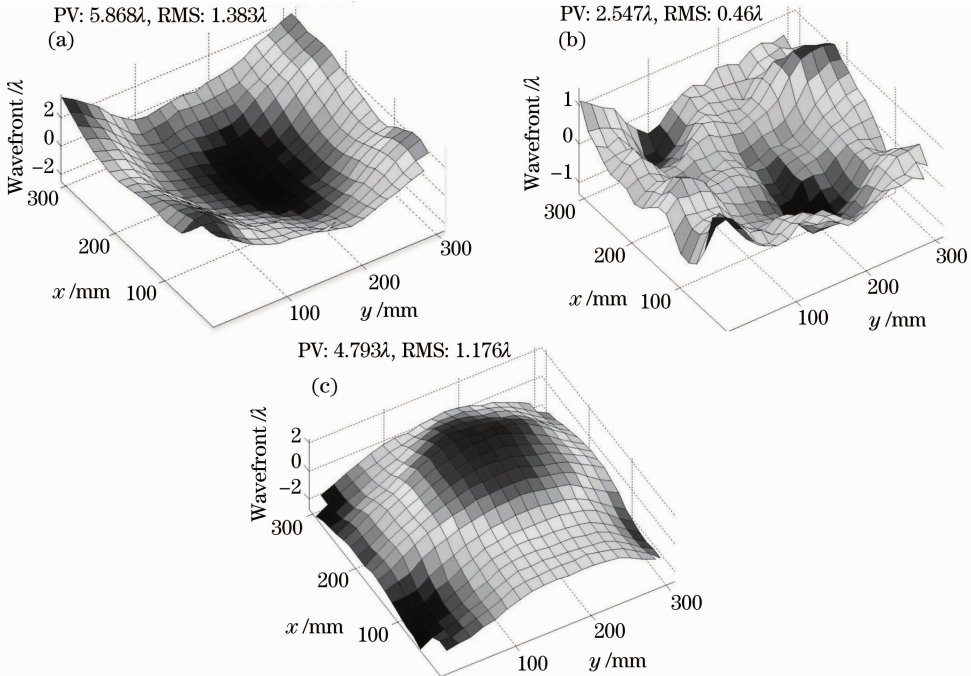


图 7 第 4 束 5000 J 能量发次输出波前。(a) 变形镜加压预校正后波前;(b) 激光发射测量波前;(c) 瞬时动态波前

Fig. 7 Wavefronts of the fourth beam of 5000 J . (a) Wavefront after deformable mirror applied with drive voltage; (b) measuring wavefront of the beam shot; (c) prompt pump-induced wavefront

图 7(a)为自适应光学系统中变形镜加载预校正电压后的测量波前,图 7(b)为激光发射瞬间的测量波前。图 7(c)为间接计算得到的瞬时动态波前,据图 7(c)得到瞬时动态波前 PV 值为 4.79λ ,像差特征以离焦和像散为主。

将瞬时动态波前的模拟计算结果图 5(c)与驱动器第 4 束的实验结果图 7(c)对比,发现模拟计算和实验采集的瞬时动态波前在数值和形态上吻合,波前呈“瓦片”形态。模拟计算和实验结果的差异主要在于垂直方向和边角位置,原因是模拟分析中难以对敏

玻璃介质边角的实际夹持应力等造成的影响进行准确分析。不难看出模拟计算的瞬时动态波前在垂直方向的均匀性明显好于实验结果在垂直方向的均匀性,说明工程实施初期驱动器片状放大器在垂直方向上抽运具有较大非均匀性。尽管不同激光束组间钹玻璃排布和机械装夹等具体参数存在着差异,其束间静态波前差异大,但瞬时动态波前差异较小,存在一致性,峰谷值都在 5λ 左右。4 束光束的静态波前和瞬时动态波前参数如表 1 所示。

表 1 4 束光束的静态波前和瞬时动态波前

Table 1 Static wavefronts and prompt pump-induced wavefronts of the four beams

Number of beam	Static wavefront		Prompt pump-induced wavefront distortion	
	PV / λ	RMS / λ	PV / λ	RMS / λ
5	4.322	0.818	4.251	1.130
6	5.741	1.014	4.507	1.120
7	2.250	0.556	4.571	1.108
8	5.464	1.066	4.660	1.167

在放大器后期改进中,根据模拟计算和实验结果的对比分析,采取加装上下镀银反射板的改善措施,以保证氙灯抽运在垂直方向具有更好的均匀性。图 8(a)为无反射板的驱动器第 4 束的瞬时动态波前,图 8(b)为加装上下镀银反射板后第 8 束的瞬时

动态波前,图 8(c)为此两束激光动态波前在 $y = 155\text{ mm}$ 截面(垂直方向)的均匀性对比图,根据图 8(c)可知,加装上下镀银反射板的第 8 束瞬时动态波前的对称性和抽运均匀性明显优于未加装反射板的第 4 束瞬时动态波前的对称性和抽运均匀性,

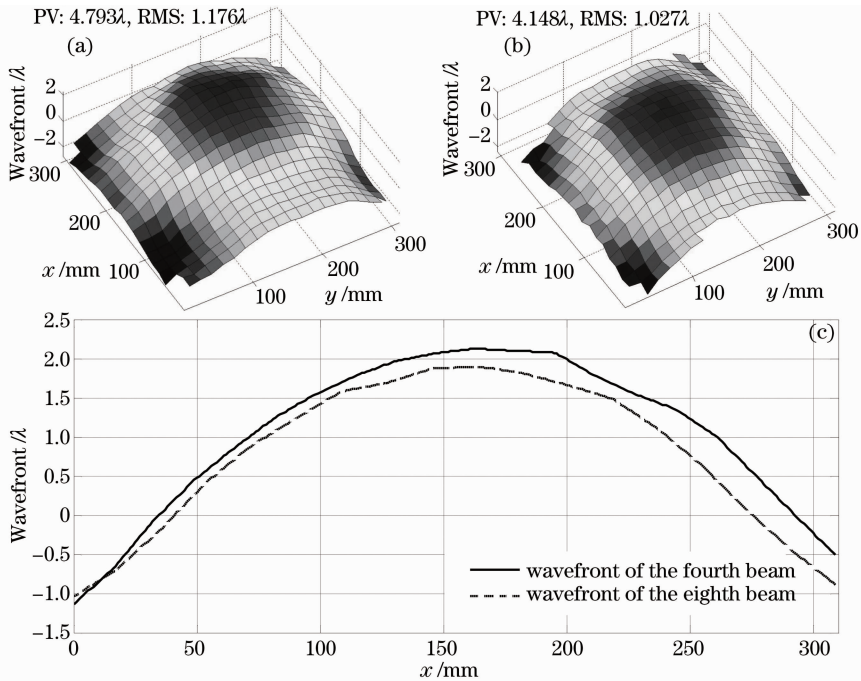


图 8 加装上下镀银反射板对动态波前的影响。(a) 无反射板的驱动器第 4 束动态波前; (b) 加装上下镀银反射板的驱动器第 8 束动态波前;(c) $y = 155\text{ mm}$ 截面的动态波前对比图

Fig. 8 Prompt pump-induced wavefronts with and without silver coated reflector. (a) Prompt pump-induced wavefront of the fourth beam without reflector; (b) prompt pump-induced wavefront of the eighth beam with silver coated reflector; (c) contrast of prompt pump-induced wavefronts when y is equal to 155 mm

因此激光系统瞬时动态波前的模拟计算和实验研究为激光驱动器片状放大器的优化改进和后续设计提供了参考数据。

另外,瞬时动态波前模拟计算和实验结果的分析还为激光光束波前校正提供了计算依据。在激光光束波前校正研究中,通过模拟计算和多次激光发射实验数据预估出本次瞬时动态波前的大小和形态,进而生成并加载相应的变形镜预校正电压,在此条件下全激光链路完成精密准直,避免激光发射时发生堵孔效应,提高了空间滤波器过孔效率,保障了全激光系统的安全运行。

4.3 热恢复过程

热恢复像差为激光发射后主放大器剩余热能带来的波前畸变,为了保障驱动器片状放大器的安全,高能激光发射后首先利用氮气主动冷却 0.5 h,主动冷却后的激光系统进入长时间热恢复过程,图 9 为神光 II 四程放大高功率激光驱动器热恢复过程特征曲线。

图 9 中三条曲线分别为热恢复过程采集的输出波前、去除静态像差的热恢复像差及热恢复像差中

的离焦像差变化。据图 9 可知热恢复过程存在 4 个阶段:1) 0.5 h 的氮气主动冷却阶段,氮气的扰动使得采集的热恢复像差数据无效;2) 冷却氮气撤去后,片状放大器残余热能占主导地位,热恢复输出像差 PV 值快速从 2.5λ 上升到 7λ ;3) 外界环境与片状放大器的热交换以散热为主,热恢复像差在 2.5 h 下降到 2λ 内;4) 2.5 h 后,环境和片状放大器的热交换趋于平衡,系统输出以静态像差为主要特征,波前峰谷值稳定在 2λ ,方差为 0.097,系统完成整个热恢复过程。由离焦像差曲线可以看出,在热恢复过程中,离焦像差在 1.5 h 前为负值,光束波面呈现发散特征,而 1.5 h 后,光束波面开始逐渐具有会聚特征,2.5 h 后离焦像差基本稳定。另外实验中对氮气充气时间进行了多次的调整,发现氮气冷却 0.5 h 对于系统高效运行最为理想,0.5 h 冷却时间既保证驱动器被带走了足够的残余热能,保护了驱动器的安全,也降低了氮气消耗的运行成本,具有较高的性价比。根据上述驱动器热恢复的变化规律,神光 II 四程放大高功率激光驱动器目前以 4 h 为周期开展运行实验,达到驱动器设计要求。

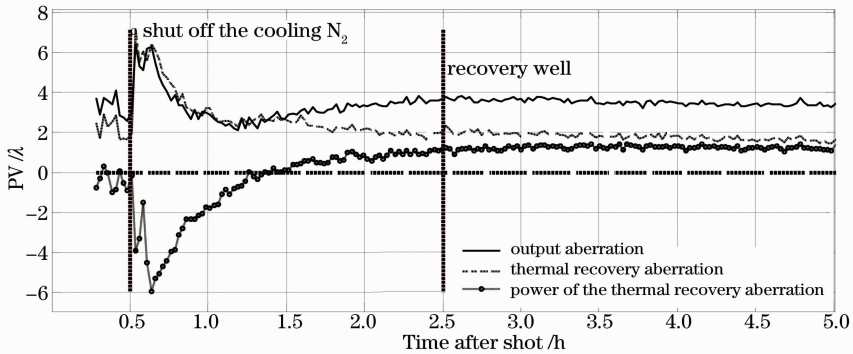


图 9 第 7 束的热恢复像差

Fig. 9 Thermal recovery aberrations of the seventh beam

5 系统波前校正

神光 II 四程放大高功率激光驱动器为脉冲激光装置,重复频率很低($4\sim 6\text{ h}^{-1}$),但激光发射却在百微秒时间内完成,因而无法对系统输出波前进行实时反馈并有效控制,因此在实验中通过模拟计算和多次激光发射实验数据预估驱动器当前发次输出波前特征,并依此生成并加载预校正电压,再利用自适应光学系统(AO)进行波前补偿。通过对神光 II 四程放大高功率激光驱动器动态波前的模拟计算和实验研究,得到了动态波前特征规律,为 AO 波前校正系统提供了数据参考,并最终提高了激光驱动器的输出光束质量。图 10 为驱动器第 8 束 5344 J 能量

发次输出波前,图 10(a)为驱动器第 8 束 5344 J 能量发次输出波前残差,峰谷值为 1.909λ ,均方根为 0.367λ ,图 10(b)为远场焦斑,(c)为环围能量分布, ω_{DL} 为衍射极限光斑尺寸,根据方形衍射极限公式有 $\omega_{DL} = \lambda f/D$,将波长 $\lambda = 1053\text{ nm}$ 、焦距 $f = 16000\text{ mm}$ 、方形口径边长 $D = 310\text{ mm}$ 代入,得到 $\omega_{DL} = 54\text{ }\mu\text{m}$ 。通过 AO 波前补偿后系统输出光束 95.5% 的能量集中于 $6.33\omega_{DL}$ 内,满足了驱动器 95% 的能量集中到 $10\omega_{DL}$ 内的设计要求。然而当未准确预校正瞬时动态波前时,系统输出 95% 能量的远场焦斑半径却变为 $15.08\omega_{DL}$,无法满足驱动器正常运行。

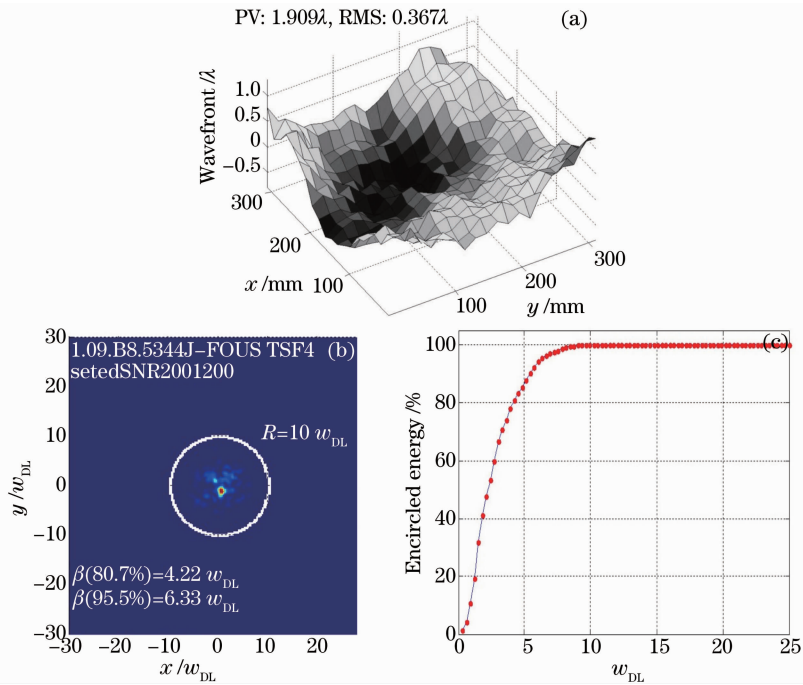


图 10 第 8 束 5344 J 能量发次输出波前质量。(a) 波前残差;(b) 焦斑形态;(c) 能量分布曲线

Fig. 10 Wavefront quality of the eighth beam of 5344 J. (a) Wavefront residual error; (b) focus spot shape; (c) encircled energy distribution curve

6 结 论

以神光 II 四程放大高功率激光驱动器为研究平台,建立了瞬时动态波前三维模型,模拟计算其大小和形态,并实验研究了氙灯抽运引入的瞬时动态像差和片状放大器热恢复像差。模拟计算和实验研究具有很好的一致性,并为神光 II 四程放大高功率激光驱动器的放大器优化改进和光束顺利通过空间滤波器提供了参考数据,显著提高了自适应光学波前补偿后终端输出光束波前质量和远场焦斑能量集中度,保障了驱动器的运行安全和工作效率。为进一步优化和改进片状放大器性能,将在后续研究中对片状放大器热恢复时间变化特性进行更为详细的模拟分析。

致谢 感谢中国科学院光电技术研究所为神光 II 四程放大高功率激光驱动器研制的波前控制系统和杨泽平老师提供的技术指导,并感谢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器件组、测控组的密切合作。

参 考 文 献

1 Yang Zeping, Li Ende, Wang Haiying, *et al.*. Adaptive optical system for a large-aperture Nd:glass laser for ICF[C]. SPIE, 2004, 5639. 21-27.

2 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.
3 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聚变领域应用的新进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1625-1634.
4 Doug Homoelle, Mark W Brows, Tracy Budge, *et al.*. Measurement of the repeatability of the prompt flashlamp-induced wavefront aberration on beamlines at the national ignition facility [J]. Appl Opt, 2011, 50(22): 4382-4388.
5 H T Powell, A C Erlandson, K S Jancaitis, *et al.*. Flashlamp pumping of Nd:glass disk amplifiers[C]. SPIE, 1990, 1277: 103-120.
6 S Sutton, C Marshall, C Petty, *et al.*. Thermal recovery of NIF amplifiers[C]. SPIE, 1997, 3047: 506-568.
7 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo, *et al.*. Modeling of residual thermo-optical distortions of the main amplifier of SG-III prototype[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(5): 385-390.
於海武, 郑万国, 贺少勃, 等. 神光 III 原型装置主放大器剩余热畸变模拟研究[J]. 中国激光, 2001, 28(5): 385-390.
8 Yang Jiankun, Cao Dingxiang, Zheng Wanguo, *et al.*. Analysis of transient temperature and thermal stress distribution for heat capacity disk laser[J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 196-199.
杨建坤, 曹丁象, 郑万国, 等. 热容模式下片状激光介质瞬态温度及热应力分析[J]. 激光技术, 2007, 31(2): 196-199.
9 Chen Lin, He Shaobo, Yu Haiwu, *et al.*. Pump-induced wavefront distortion of the 4×2 assembled slab amplifier with 400 mm aperture[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 59-63.
陈 林, 贺少勃, 於海武, 等. 400 mm 口径 4×2 组合式片状放

- 大器的动态热畸变[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 59-63.
- 10 Cao Dingxiang. Study on Thermal Effects and Thermal Management in High Power Solid State Lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 157-172.
曹丁象. 高功率固体激光系统的热效应及热管理研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008. 157-172.
- 11 Guo Ailin, Zhu Haidong, Tang Shiwang, *et al.*. Residual wavefront aberration of high-power laser facility[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0814002.
郭爱林, 朱海东, 唐仕旺, 等. 高功率激光驱动器波前残余像差研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0814002.
- 12 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.
- 13 F W Quelle. Thermal distortion of diffraction-limited optical elements[J]. Appl Opt, 1966, 5(4): 633-637.
- 14 Li Mengyang, Li Dahai, Wang Qionghua, *et al.*. Wavefront reconstruction with orthonormal polynomials in a square Area [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108011.
李萌阳, 李大海, 王琼华, 等. 用方形区域内的标准正交多项式重构波前[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108011.
- 15 Duan Haifeng, Yang Zeping, Wang Shuqing, *et al.*. Model wavefront reconstruction of Shack-Hartmann sensor on arbitrary area and wavefront expression by Zernike polynomials [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(6): 517-520.
段海峰, 杨泽平, 王淑青, 等. 夏克-哈特曼传感器任意形状孔径波前的模式重构及 Zernike 多项式描述[J]. 中国激光, 2002, 29(6): 517-520.

栏目编辑: 史敏