

# 神光 II 升级装置波前传输计算模型与验证

郭爱林<sup>1</sup> 朱海东<sup>1\*</sup> 杨泽平<sup>2</sup> 李恩德<sup>2</sup> 谢兴龙<sup>1</sup> 朱健强<sup>1</sup> 林尊琪<sup>1</sup> 马伟新<sup>3</sup> 朱 俭<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 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  
<sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209  
<sup>3</sup> 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** 基于衍射理论和神光 II 升级激光装置的光路结构及光学元件波前像差, 建立了激光装置光束波前像差传输计算模型, 用以获取在实验中难以取得, 但对激光系统设计和安全运行非常重要的变形镜校正面型、放大器动态波前像差、空间滤波器波前像差和焦斑形态等过程数据。利用该模型对激光装置常规运行时的静态传输、变形镜加压静态传输和大能量发射 3 种状态下的波前传输进行理论分析, 计算结果与实验测量相一致, 并在此基础上对变形镜未加大能量发射波前传输进行计算。计算模型可用于指导相关器件的设计, 优化激光运行控制模式, 有利于提高激光装置输出波前质量。

**关键词** 激光光学; 高功率激光; 传输计算; 波前控制; 聚焦能力

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0214001

## Wavefront Propagation Modeling and Verification of the SG-II Updated Laser Facility

Guo Ailin<sup>1</sup> Zhu Haidong<sup>1</sup> Yang Zeping<sup>2</sup> Li Ende<sup>2</sup> Xie Xinglong<sup>1</sup>  
Zhu Jianqiang<sup>1</sup> Lin Zunqi<sup>1</sup> Ma Weixin<sup>3</sup> Zhu Jian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Joint Laboratory on High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>3</sup> Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

**Abstract** Based on the diffraction theory, the specific beam structure and optics wavefront data of the SG-II updated laser facility, a calculation model of the wavefront propagation for the facility is established. Using the calculation model some important data for design and operation of the facility are gained, including the corrected profile of deformed mirror, dynamic wavefront aberration of the amplifier, wavefront aberration and focus of the spatial filter, which are difficult to get by experiment. Analysis and comparison under three types of conventional operation, such as static propagation, static propagation and large energy shot with adaptive wavefront correction, indicates that the theoretical results are in good agreement with the experimental data. And the wavefront propagation of large energy shot in absence of the adaptive wavefront correction is calculated. The wavefront propagation model can be used to improve design of the related devices, optimize operation and control mode of the laser facility, and improve wavefront quality of the output laser beam.

**Key words** laser optics; high-power laser; propagation calculation; wavefront control; focus ability

**OCIS codes** 050.5080; 140.3460; 350.5500

## 1 引 言

波前质量控制是大口径高能激光装置的重要研究内容, 它关系到激光装置运行的安全性和强场物

理打靶实验的有效性<sup>[1,2]</sup>。光束波前像差可分为静态波前像差和动态波前像差两大类<sup>[3]</sup>, 静态波前像差主要来自光学元件的材料不均匀、加工误差、夹持

**收稿日期:** 2012-07-19; **收到修改稿日期:** 2012-08-07

**基金项目:** 国家 863 计划(2011AA8044010)和高功率激光物理联合实验室研究发展基金资助课题。

**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

应力和光路安装误差等,动态波前像差主要来自放大器热梯度和不均匀抽运、空气扰动和机械震动等<sup>[4~6]</sup>。根据波前像差的空间尺度分布,又可分为低频、中频和高频像差。为了降低光束波前像差对系统的不利影响,在光学元件加工和光路安装阶段应尽可能地降低激光系统的静态像差,在此基础上利用空间滤波器小孔滤除高频像差成分,利用自适应光学系统对激光束低频波前像差进行主动控制,提高激光装置输出波前质量<sup>[7]</sup>。

在激光装置的常规运行模式中,按先后顺序激光束有3种传输状态:1)变形镜未加压状态下光路自动准直阶段的静态传输;2)变形镜校正系统静态像差且预补偿放大器动态像差时的静态传输;3)变形镜加压下高能激光传输。不同传输状态下激光系统中不同的像差分布对光路准直和滤波器穿孔带来不利影响。尤其在状态2),由于动态像差与静态像差的差异较大,变形镜预补偿放大器动态像差容易导致准直焦斑偏离标定位置,甚至滤波小孔挡光而造成近场缺光,进而破坏波前传感器测量数据的正确性。为了避免激光发射时出现空间滤波器小孔堵塞造成激光近场强度调制而危及激光装置的安全运行<sup>[8]</sup>,在实验中采取重新准直光路后再修改变形镜驱动电压,牺牲部分波前校正能力确保激光能量顺利地输出。为了优化装置运行过程中光路准直,空间滤波和波前输出质量的关系,需要掌握装置中波前像差的分布和传输情况,用于指导空间滤波器、变形镜等相关器件的设计,优化激光运行控制模式,提高激光装置输出波前质量,确保激光装置安全运行<sup>[9,10]</sup>。

本文针对神光 II 升级装置光路结构,基于衍射

理论建立波前像差传输计算模型,结合实验测量数据,分析不同运行状态下装置波前像差的分布与传输,为合理设计滤波孔尺寸,优化系统准直方式,获取变形镜校正面型和系统动态波前像差数据提供有效分析手段。为了确保非常规运行下激光系统的安全性,对波前未校正大能量激光发射时光束波前像差分布和传输进行了分析。

## 2 光路结构

神光 II 升级激光装置采用与美国国家点火装置(NIF)相同的主放大器构型,该构型具有空间紧凑,能量提取效率高,经济节约的特点,较好地满足惯性约束核聚变对激光驱动器的要求。神光 II 升级激光装置主放大器光路结构如图 1 所示,来自预放大器(PreA)的激光束从传输滤波器(TSF)的注入孔(1孔)向助推放大器(PA)方向传输,经 PA 第 1 次放大后以 p 偏振的方式入射偏振片 P1。由于 P1 对 p 偏振激光束具有较高的反射率,而对 s 偏振具有较高的透射率,使激光束向腔滤波器(CSF)方向传输,经腔放大器(CA)第 1 程放大后入射到变形镜(DM)上再反射回 CSF 进行第 2 程放大。此时等离子体电光晶体(PEPC)加载的高压会改变透过光束的偏振方向,使其以 s 偏振的方式入射偏振片 P1,从而以较高的透过率穿过 P1,经腔反射镜(CM)反射回 PEPC 后偏振方向恢复到之前的 p 偏振状态,然后关闭 PEPC 电压。光束再次由 CA 进行第 3,4 程放大后返回到 P1 上,由于此时光束为 p 偏振,P1 将其反射回 PA 进行第 2 次放大,最后经 TSF4 孔注入到靶场系统<sup>[11]</sup>。

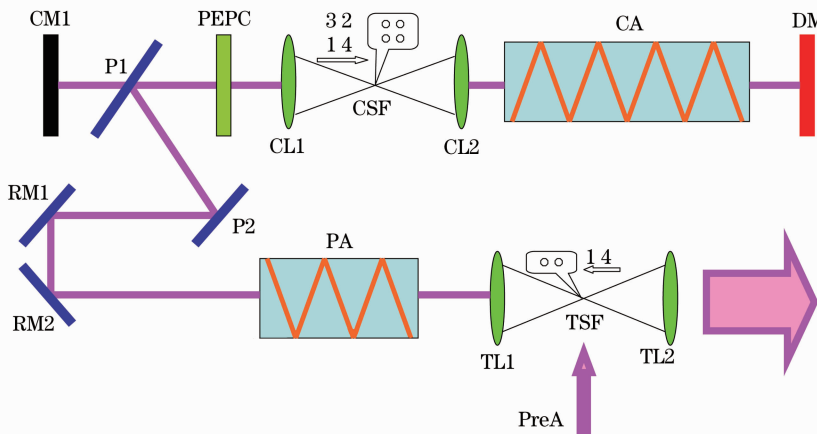


图 1 神光 II 升级主放大器

Fig. 1 Main amplifier of the SG-II updated laser facility

在 TSF 输出端放置楔形取样镜, 取样光束经缩束后进入哈特曼波前传感器, 用于测量 TSF 输出激光的波前像差。

### 3 波前传输计算模型

激光装置波前传输模拟计算和分析主要涉及 6 方面的工作: 1) 光学件 Zygo 干涉仪波前像差测量; 2) 激光链路光场复振幅衍射计算; 3) 光场复振幅波前重构计算; 4) 空间滤波器焦斑形态计算; 5) 变形镜校正面型计算; 6) 放大器动态波前计算。

$$G_0(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x, y, 0) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy, \quad (1)$$

$$G_z(f_x, f_y) = G_0(f_x, f_y) \exp\{ikz[1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2]^{1/2}\}, \quad (2)$$

$$U(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_z(f_x, f_y) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为入射波长,  $f_x, f_y$  为频域坐标  $k = 2\pi/\lambda$ 。利用(1)式定义的傅里叶变换, 计算入射光的频谱函数, 将其结果代入传递(2)式, 得到衍射光的频谱函数, 然后根据(3)式定义的傅里叶逆变换计算得衍射场的光波复振幅分布。将光学件波前像差嵌入到入射光场复振幅的相位项求得射出光场复振幅, 结合传输距离等参数代入角谱衍射公式, 即可求得后续光学件入射光场复振幅数据。根据具体激光链路依次迭代计算, 从而完成整个光学链路的衍射计算。

由于高功率激光装置属于大像差系统, 不能直接将光场复振幅的相位角作为光束的波前像差。本模型利用哈特曼波前传感器的波前测量原理, 计算微透镜焦斑阵列的偏离量后采用波前重构算法获得激光束波前像差数据<sup>[13]</sup>。为了便于对比理论分析与实验结果, 该哈特曼波前传感器计算机模型采用与实验中波前传感器相同的结构参数。

光学元件波前像是激光装置静态像差的主要来源<sup>[14]</sup>, 将其嵌入激光链路光场衍射计算程序, 即可获得装置的静态波前像差分布和传输情况。因此, 利用光学元件间波前像差的互补性可以有效降低装置的静态像差。神光 II 升级系统由 8 路激光组成, 为光学元件的优化匹配提供了便利。在波前传输计算程序的基础上编写了基于像差互补的光学件优化选择程序, 可将激光链路输出静态波前像差峰谷(PV)值由 8~10  $\mu\text{m}$  降低到 4~6  $\mu\text{m}$ , 明显改善系统静态输出波前质量。

根据激光的标量衍射理论可知, 瑞利-索末菲公式、角谱衍射公式均是波动方程的准确解, 在遵循取样定理的条件下均能采用快速傅里叶变换(FFT)的算法<sup>[12]</sup>。本模型采用取样条件更容易满足的角谱衍射公式来计算光束的衍射过程, 根据光束实际传输过程逐件计算光学件的入射光场复振幅。

设  $U_0(x, y, 0)$  和  $U(x, y, z)$  分别为入射面( $z = 0$ )和观察面上的光场复振幅, 相应的频谱为  $G_0(f_x, f_y)$  和  $G_z(f_x, f_y)$ , 根据衍射的角谱传播理论, 观察面上光场复振幅的计算公式为

静态像差确定后, 影响激光波前传输的主要因素是变形镜面型和放大器动态波前像差, 受光路结构和空间限制, 难以直接测量该数据。本计算模型利用哈特曼波前传感器测得的 TSF 输出波前像差, 结合系统中已知波前像差数据, 基于以相位梯度, GRMS 描述的低频波前像差传输特性, 可获得变形镜面型和放大器动态波前像差数据<sup>[15,16]</sup>。

神光 II 升级激光装置在自适应光学系统校正部分波前像差的条件下, 于 2012 年 5 月实现单路 5135 J 的输出实验, 以下均以这次实验采集的波前像差数据开展理论计算模型与实验结果的分析 and 对比。

### 4 静态像差分布计算

为了降低静态输出波前像差, 神光 II 升级装置所有光学元件在上线安装前均须通过 Zygo 干涉仪波前质量测试。光学元件的支撑机构设计, 光路调整均严格控制夹持应力和光路偏轴等引起的波前像差。

Zygo 干涉仪测试数据的空间分辨率为 643  $\mu\text{m}$ , 测试数据包含了整个光学元件的波前像差数据, 而主放大器实际光束为边长 310 mm 和 290 mm 的方口径光束(如图 1 所示), 为了使衍射计算更准确地描述实际光束传输过程, 在 Zygo 干涉仪测量数据上选取出实际通光区域的波前像差数据。

图 2 为单路激光系统 TSF 静态输出波前像差理论计算和实验测量结果。图中给出了波前像差的

PV 值,均方根(RMS)值和 GRMS 参数。根据文献 [15,16]的报道和分析,激光束聚焦能力与波前像差 GRMS 关联性最大<sup>[15,16]</sup>,因此后续分析中通过对比理论与实测波前像差 GRMS 的一致性来验证计算模型的准确性。由图 2 可见理论计算与实验测量的 TSF 输出静态波前像差的形态及 GRMS 基本一致。

需要说明的是,在实验测量 TSF 输出波前像差时,由于光束的边缘光强较弱使得波前传感器无法完整地采集到全口径微透镜焦斑阵列,因此实际测得的数据是光束部分口径的波前像差,对比图 2(a)和图 2(b)可以看出,图 2(a)去掉四周部分后就成了图 2(b)的形态。

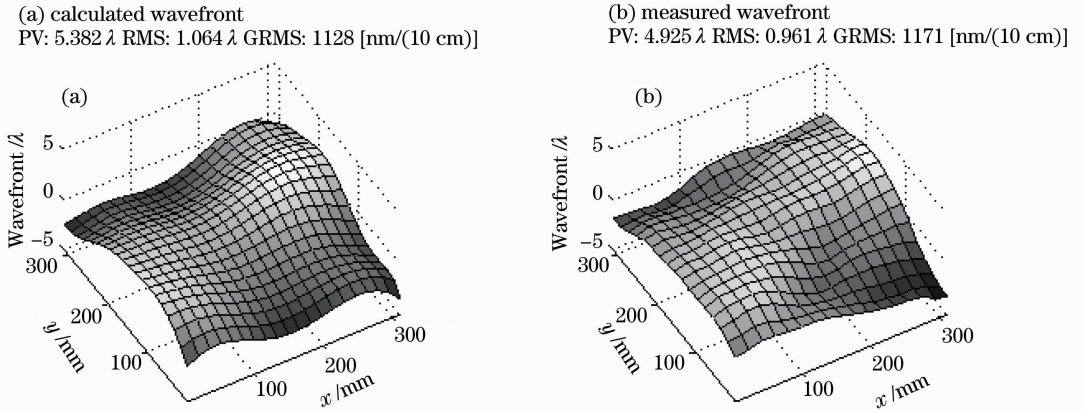


图 2 静态传输时 TSF4 输出波前像差

Fig. 2 Wavefront aberration of TSF4 under static propagation

静态波前传输时理论分析与实验结果相一致,表明光学元件夹持应力和安装误差对激光聚焦能力的影响较小,而激光装置静态波前像差主要来自光学元件波前像差。激光装置空间滤波器小孔设计、光路精密准直与注入到空间滤波器的波前像差密切相关<sup>[8]</sup>,表 1 为静态传输时注入滤波器的波前参数和远场焦斑 95% 包围能量衍射极限倍数(DL,定义为相对艾里斑尺寸的倍数)。为验证理论计算的准确性,表中给出了 TSF-4 输出光束波前像差的实验测量结果。

前像差互补造成的。工程应用中需要根据焦斑大小优化空间滤波器小孔尺寸,在保证主体激光能量穿孔的前提下有效地截止中高频波前像差,确保激光装置安全运行<sup>[17]</sup>。

表 1 静态传输时滤波器波前参数和聚焦数据

## 5 变形镜加压时静态像差分布计算

由于变形镜无法实时校正脉宽为纳秒级的单次高能激光脉冲,因此实际激光装置都采用变形镜预先加载驱动电压,校正系统静态且预补偿放大器动态波前像差后,保持校正面型不变等待激光发射的工作模式<sup>[1]</sup>。

变形镜加载的驱动电压是根据系统动态输出波前像差,在小能量激光引导下由自适应光学系统闭环控制生成的。与静态传输的区别在于系统中变形镜的面型不同,从而改变光路准直和空间滤波器过孔的状态。为了分析变形镜处于加压等待激光发射期间光束波前像差的分布和传输,首先需要获得变形镜的加压面型。设变形镜第 1 程入射光束波前像差为  $P_{pass1 in}$ ,腔放大器第 2,3 程波前像差为  $P_{pass23}$ ,变形镜第 4 程输出光束波前像差为  $P_{pass4 out}$ ,设变形镜加压面型为  $P_D$ ,则低频段的波前像差满足

$$P_D = (P_{pass4 out} - P_{pass1 in} - P_{pass23})/4, \quad (4)$$

式中  $P_{pass4 out}$  由激光装置输出波前像差经逆向衍射计算求得,计算结果如图 3 所示。

Table 1 Wavefront parameters and focusing data of spatial filters under static propagation

Spatial filter	Wavefront parameters			Focusing data
	PV / λ	RMS / λ	GRMS / [nm/(10 cm)]	95% DL
CSF1	0.593	0.130	169	4.1
CSF2	2.928	0.612	816	9.6
CSF3	2.844	0.539	651	8.2
CSF4	5.617	1.075	1383	14.5
TSF4	5.382	1.064	1128	13.4
Experimental value	4.925	0.961	1171	13.2

由表 1 可以看出,激光静态传输过程中光束波前像差并非越远越差,如 CSF3 较 CSF2 有所改善,TSF4 较 CSF4 亦有所改善,这是因为光学元件间波

根据变形镜加压面型数据和其他光学元件波前像差数据,导入波前传输计算程序,即可获得变形镜

加压时注入滤波器的光束波前像差、聚焦数据以及 TSF 输出波前像差,如表 2 和图 4 所示。

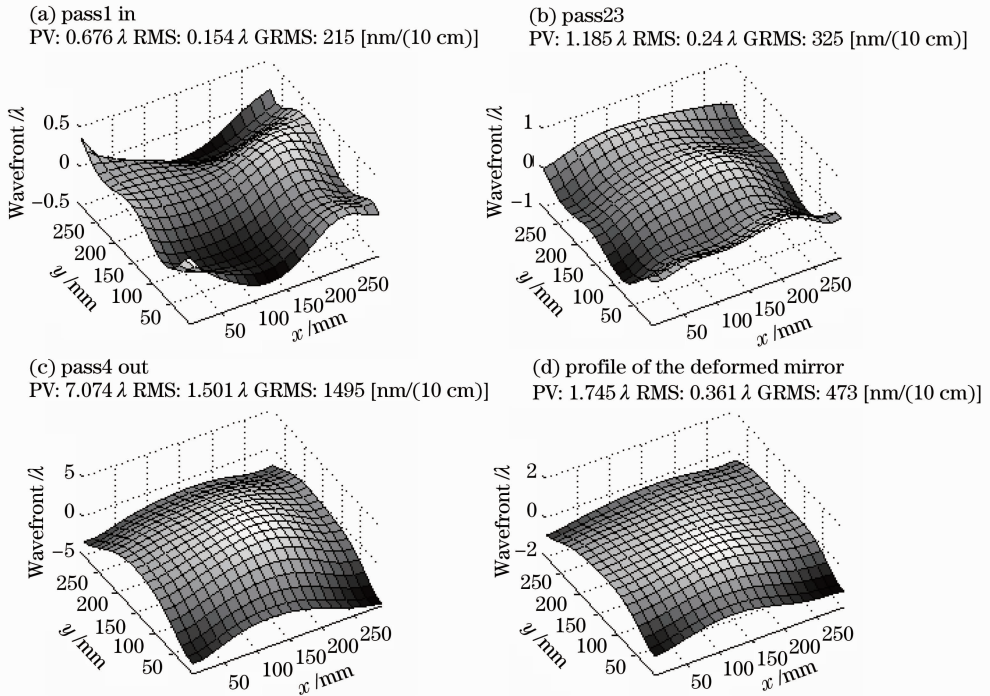


图 3 变形镜加压面型计算

Fig. 3 Calculated shape profile of the deformed mirror applied with drive voltage

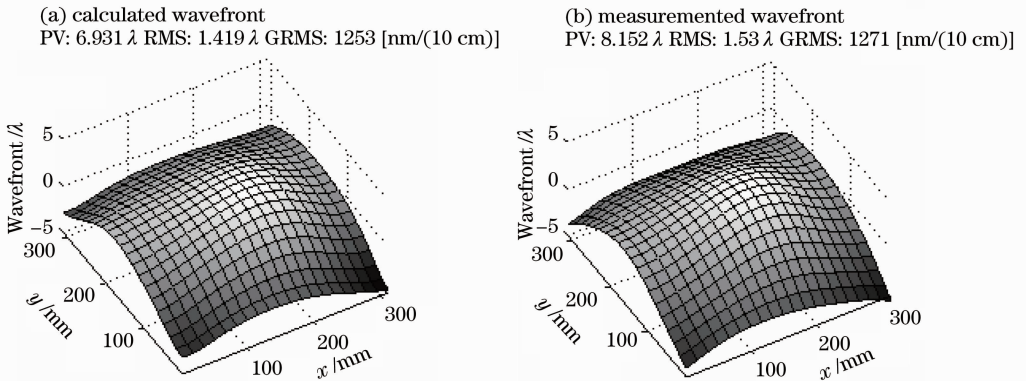


图 4 变形镜加压静态传输时 TSF4 输出波前

Fig. 4 Wavefront of TSF4 under static propagation with deformed mirror applied with drive voltage

表 2 变形镜加压静态传输时滤波器波前和聚焦数据

Table 2 Wavefront parameters and focusing data of spatial filters under static propagation with deformed mirrors

Spatial filter	Wavefront parameters			Focusing data
	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$	GRMS / [nm/(10 cm)]	95% DL
CSF1	0.593	0.130	169	4.1
CSF2	3.333	0.755	871	9.6
CSF3	3.429	0.742	605	8.3
CSF4	7.051	1.478	1441	16.4
TSF4	6.931	1.419	1253	15.5
Experimental value	8.152	1.530	1271	16.3

这种基于激光装置输出波前像差求解变形镜校正面型的算法能扩展自适应光学波前控制的灵活性,在一定条件下可以实现特定波前像差的输出,辅助终端靶场系统实现诸如状态方程、瑞利-泰勒-不稳定性、间接或直接驱动惯性约束核聚变等物理实验对焦斑形态的不同要求。

## 6 大能量发射时系统动态校正波前像差分布计算

变形镜加载校正电压后,经光束准直和近场测

量系统观察光束传输状态,评估系统运行安全性后即可进行大能量激光发射。变形镜加压后静态与大

能量发射两种状态下 TSF 输出波前像差之差即为激光系统的动态波前像差,如图 5 所示。

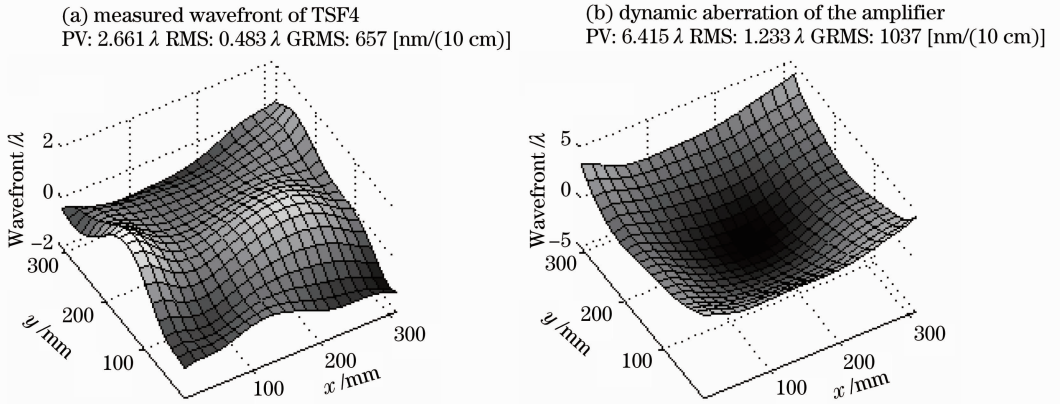


图 5 动态校正 5135 J 发射波前及放大器动态波前像差

Fig. 5 Corrected wavefront of TSF4 and dynamic wavefront aberration of amplifier (5135 J)

激光装置动态波前像差主要来自放大器的热梯度和不均匀抽运<sup>[5]</sup>,神光 II 升级装置的双程助推放大器由 5 片钕玻璃组成,4 程腔放大器由 8 片钕玻璃组成。放大器动态波前像差属于低频像差<sup>[4,16]</sup>,

将动态波前像差嵌入到钕玻璃波前像差数据中,即可计算激光发射时系统中波前像差的传输,计算结果如图 6 和表 3 所示。

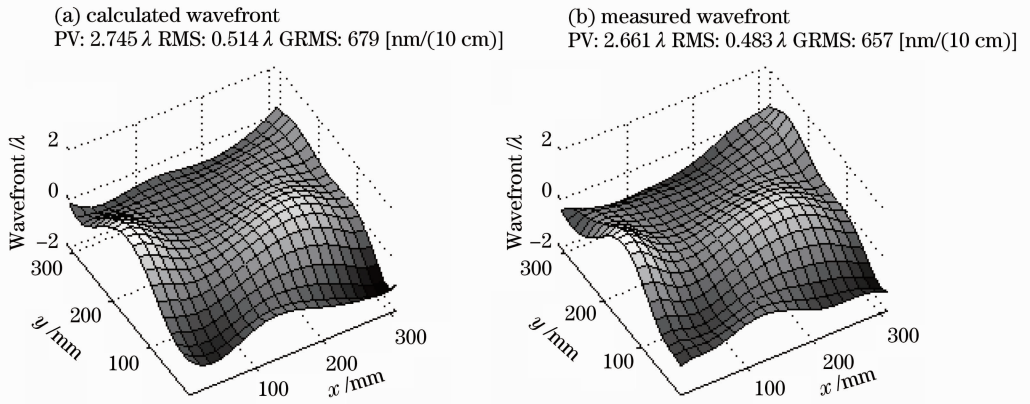


图 6 5135 J 发射动态校正时 TSF4 输出波前

Fig. 6 Wavefront of TSF4 with adaptive wavefront correction (5135 J)

表 3 5135 J 动态校正时空滤波器入射波前和聚焦数据  
Table 3 Wavefront parameters and focusing data of spatial filters with adaptive wavefront correction (5135 J)

Spatial filter	Wavefront parameters			Focusing data
	PV / λ	RMS / λ	GRMS / [nm/(10 cm)]	95% DL
CSF1	1.015	0.190	235	4.5
CSF2	1.540	0.322	591	6.6
CSF3	1.446	0.266	487	6.2
CSF4	3.196	0.617	892	9.9
TSF4	2.745	0.514	679	8.3
Experimental value	2.661	0.483	657	8.2

## 7 讨 论

根据理论分析和文献<sup>[15,16]</sup>报道,光束聚焦能力与光束波前像差 GRMS 相关。依据表 1~3 中 GRMS 与 95% 环能量焦斑尺寸数据绘制图 7,可以看出两者近似呈线性关系。事实上,除上述 3 种常规运行状态外,还需对变形镜未加载校正电压时系统大能量发射的运行状态进行分析,用以评估这种运行模式可能带来的不利影响<sup>[17]</sup>。由图 7 可见,大能量发射时输出像差较静态时有所改善,这是放大器动态波前像差与激光装置静态波前像差部分抵消的结果。空间滤波器小孔处激光焦斑尺寸由大到小的顺序是 CSF4, TSF4, CSF2, CSF3, CSF1,基于

该计算结果优化设计滤波小孔尺寸,在激光束主体能量顺利过孔的条件下有效滤除中高频波前像差。

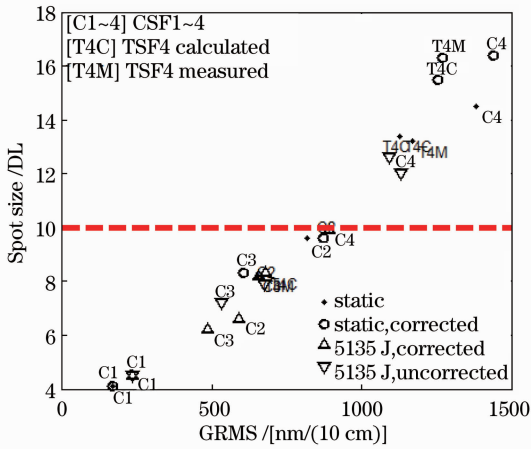


图 7 GRMS 与斑尺寸的关系

Fig. 7 Relationship between GRMS and spot size

另外,在实验中由于存在光束抖动和波前不稳定等现象,在自适应光学系统标定和闭环校正过程中出现滤波器挡光造成近场缺光的现象,实验中为了保证能量有效输出,牺牲了部分波前校正能力。尽管存在诸多不利影响因素,装置 5135 J 大能量发射仍然达到了 10 倍衍射极限内集中 95% 以上激光能量的设计要求。

## 8 结 论

介绍了神光 II 升级激光装置波前传输计算模型,对装置常规运行时激光束的 3 种传输状态进行分析,理论计算和实验结果相一致,并计算了变形镜未加压系统大能量发射的非常规运行时波前像差的传输情况。利用该计算模型可以获得在实验中难以取得,但对系统优化设计和安全运行非常重要的变形镜校正面型、放大器动态波前像差、空间滤波器波前像差和焦斑形态等过程参数。此外,利用该计算模型可以获得特定波前输出时变形镜的校正面型,在后续实验中将开展这种基于衍射计算的波前控制方案,避免在传统的标定和闭环控制工作模式下近场缺光的现象,提高波前测量数据的准确性,提升波前控制能力。

致谢 感谢光学检测组提供 Zygo 干涉仪对光学元件波前像差的检测数据。

## 参 考 文 献

- 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
- 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
- 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
- D. Homoelle, M. W. Bowers, T. 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
- S. Sutton, C. Marshall, C. Petty *et al.*. Thermal recovery of NIF amplifiers [C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 560~568
- P. Arnoux, G. Le Touze, J. P. Caltagirone *et al.*. Thermal recovery of LMJ amplifiers [C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 660~664
- R. Zacharias, E. Bliss, M. Feldman *et al.*. The National Ignition Facility wavefront control system [C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 678~692
- 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
- T. A. Planchon, J. P. Rousseau, F. Burgy *et al.*. Adaptive wavefront correction on a 100-TW/10-Hz chirped pulse amplification laser and effect of residual wavefront on beam propagation [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **252**: 222~228
- 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
- R. A. Zacharias, N. R. Beer, E. S. Bliss *et al.*. Alignment and wavefront control of the National Ignition Facility [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2873~2884
- J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* (Third Edition) [M]. Roberts and Company Publisher, 2005
- D. M. Topa. Wavefront reconstruction for the Shack-Hartmann wavefront sensor [C]. *SPIE*, 2002, **4769**: 101~115
- W. H. Williams, J. M. Auerbach, M. A. Hennesian *et al.*. Modeling characterization of the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 1998, **3264**: 93~104
- L. K. Lawson, J. M. Auerbach, R. E. English *et al.*. NIF optical specifications-the important of the RMS gradient [C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 336~343
- W. Williams, J. Auerbach, J. Hunt *et al.*. NIF optics phase gradient specification [R]. National Technical Information Service; UCRL-ID-127297
- R. Zacharias, E. Bliss, S. Winters *et al.*. Wavefront control of high-power laser beams in the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 332~343

栏目编辑: 宋梅梅