

# 波前畸变下连续相位板焦斑的计算与实验

温圣林 颜浩 张远航 杨春林 王健 石琦凯

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 为了提高惯性约束聚变(ICF)激光装置中连续相位板(CPP)的焦斑性能,建立了波前畸变下连续相位板焦斑的理论计算和分析模型,并根据 CPP 使用条件搭建了三倍频大口径 CPP 远场离线测试系统。对加工 330 mm×330 mm 口径的 CPP 和波前畸变元件进行了理论计算和离线测试实验的对比研究。理论计算和实测的焦斑形貌、参数数值均非常一致,验证了计算模型的正确性和实验系统的可靠性。理论和实验结果一致表明,波前畸变对 CPP 焦斑性能的影响非常严重,当弥散斑为 0.5 倍 CPP 焦斑时,畸变量已对 CPP 焦斑形貌产生了很大影响,能量利用率下降值大于 4%,焦斑半径增大超过 20 μm,陡边阶数下降 1.3 阶,不均匀性均方根(RMS)值下降 6%,旁瓣份额增长超过 0.5%。

**关键词** 光学器件;连续相位板;焦斑;波前畸变;光束匀滑;惯性约束聚变

**中图分类号** O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0314001

## Calculation and Experiment of the Focal Spot Caused by Continuous Phase Plate with Incident Wavefront Distortion

Wen Shenglin Yan Hao Zhang Yuanhang Yang Chunlin Wang Jian Shi Qikai

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In order to improve the focal spot performance caused by continuous phase plate (CPP) in the laser facility for inertial confinement fusion (ICF) system, a theoretical calculation and analyse model for CPP with wavefront distortion is proposed, and off-line measurement system with three harmonic generation laser for the far-field intensity is built up according to the working conditions of CPP in the laser system. The comparison between calculation and measurement for the 330 mm×330 mm CPP and wavefront distortion component is carried out. The pattern and parameters are matched very well, so the correctness of calculation model and the credibility of measurement system are certified. The results show that the CPP's focal spot performance is effected by the incident wavefront distortion severely. The CPP's focal spot is changed largely when the disc of confusion caused by wavefront distortion is equal to half of the focal size caused by CPP. The changes include that the capacity usage ratio descends more than 4%, the focal spot radius increases over 20 μm, the super-Gauss order of the focal spot profiles reduces 1.3, the root mean square (RMS) value of inhomogeneity reduces 6%, and the percentage of side lobe increases over 0.5%.

**Key words** optical device; continuous phase plates; focal spot; wavefront distortion; beam smoothing; inertial confinement fusion

**OCIS codes** 050.1940; 120.4820; 140.3300; 230.1950; 220.4840

## 1 引 言

2012年美国国家点火装置(NIF)点火失败再次证明惯性约束聚变(ICF)物理内爆实验中对称性和稳定性控制的重要性<sup>[1]</sup>,而控制靶面光场均匀性是控制内爆对称性和稳定性的一个重要步骤<sup>[2-3]</sup>。因

此,激光驱动装置对靶面光场均匀性提出了非常苛刻的要求。连续相位板(CPP)由于其能量利用率高、焦斑形貌易于控制等优点而被认为是实现 ICF 靶面光场控制的一种重要光学元件,近年来国内外学者分别从理论设计、加工工艺、性能分析等方面开

**收稿日期**: 2013-08-20; **收到修改稿日期**: 2013-09-27

**基金项目**: 国家科技重大专项课题(2013ZX04006011-101)

**作者简介**: 温圣林(1980—),男,硕士,副研究员,主要从事衍射光学、强激光传输与控制等方面的研究。

E-mail: shenglinwen@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

展了相关研究<sup>[4-8]</sup>,目前它已被广泛应用到美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳激光装置(LMJ)、中国神光 III 等大型激光装置中<sup>[9-11]</sup>。

CPP 应用于装置的终端光学系统中,装置前端复杂光学系统的元件装调误差、加工误差、环境稳定性等因素使得 CPP 的入射光场与理想设计输入存在较大差异,这就使得实验的 CPP 焦斑在能量集中度、均匀性等指标上与理论存在较大差异,甚至难以满足物理需求<sup>[11-12]</sup>。文献[13]针对装调误差、波前畸变等光束畸变对 CPP 焦斑的影响进行了理论研究,结果表明波前畸变是影响焦斑性能的主要因素。但由于装置系统非常复杂,波前畸变很难准确测量,而且环境不稳定等因素都会导致测量结果动态变化,因此在装置中开展波前畸变影响的实验非常困难。本文

基于衍射理论和激光装置物理需求建立了波前畸变下 CPP 焦斑计算和分析模型,为克服在线测试实验中的困难,建立了三倍频率 CPP 焦斑离线测试系统,通过理论计算和实验对比研究添加入射光波前畸变前后的 CPP 焦斑强度,分析波前畸变对 CPP 焦斑的影响,从而判定计算和实验系统的有效性。

## 2 CPP 焦斑的理论计算和实验系统

为了研究波前畸变对 CPP 焦斑的影响,可通过理论计算和实验两种途径加以分析,下面分别建立计算模型和实验测试系统。

### 2.1 波前畸变下 CPP 焦斑的理论计算

根据夫琅禾费标量衍射原理,激光装置中 CPP 的远场分布简化为<sup>[14]</sup>

$$E_o(x_o, y_o) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x_o^2 + y_o^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} E_i(x_i, y_i) \exp(-i\varphi_c) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{x_o}{\lambda z}x_i + \frac{y_o}{\lambda z}y_i\right)\right] dx_i dy_i = \mathcal{F}[E_i(x_i, y_i) \exp(-i\varphi_c)], \quad (1)$$

式中  $E_o$ 、 $E_i$  分别是输出和输入光场振幅,  $\varphi_c$  是 CPP 相位,  $\lambda$  是激光波长,  $k$  是波数,  $x_o$ 、 $y_o$ 、 $x_i$ 、 $y_i$  分别是输出和输入坐标, FFT 为快速傅里叶变换。

忽略对准误差等次要影响因素, CPP 的实际应用过程中远场主要由加工 CPP 远场和输入畸变远场的卷积得到,即

$$I_o = |\mathcal{F}[\exp(-i\varphi_c) \cdot |E_i| \exp(-i\varphi_i)]|^2 = |\mathcal{F}[\exp(-i\varphi_c)] * \mathcal{F}[|E_i| \exp(-i\varphi_i)]|^2, \quad (2)$$

式中 \* 表示数学卷积运算,  $\varphi_i$  是输入光场相位。

根据物理需求<sup>[2-3]</sup>,分析和评价 CPP 焦斑时需要考虑整形、匀滑、旁瓣三类参数,关键参数包括能量集中度  $\eta$ 、陡边阶数  $N_{sg}$ 、超过平均强度的功率份额  $P_{FOPAI}$ 、光强不均匀性  $\delta_{RMS}$ 、旁瓣百分比  $\eta_s$ ,具体计算公式定义如下:

$$\eta = \frac{\iint_{S_g} I_o(x_o, y_o) dx_o dx_o}{\iint_{S_a} I_o(x_o, y_o) dx_o dx_o} \times 100\%, \quad (3)$$

$$P_{FOPAI}(I) = \frac{\iint_{S_i} I_o(x_o, y_o) dx_o dx_o}{\iint_{S_a} I_o(x_o, y_o) dx_o dx_o} \times 100\%, \quad (4)$$

$$\delta_{RMS} = \left\{ \frac{\iint_{S_i} [I_o(x_o, y_o) - \bar{I}_o(x_o, y_o)]^2 dx_o dx_o}{\iint_{S_i} [\bar{I}_o(x_o, y_o)]^2 dx_o dx_o} \right\}^{1/2} \times 100\%, \quad (5)$$

$$\eta_s = \frac{\iint_{S_s} I_o(x_o, y_o) dx_o dx_o}{\iint_{S_a} I_o(x_o, y_o) dx_o dx_o} \times 100\%, \quad (6)$$

式中  $S_a$ 、 $S_g$ 、 $S_i$ 、 $S_t$ 、 $S_s$  分别表示焦斑全区域、设计目标、超过阈值强度、顶部、旁瓣对应的区域。通常实验要求  $\eta$  大于 95%,而下文中  $R_{80}$ 、 $R_{90}$ 、 $R_{95}$  分别指  $\eta$  为 80%、90%、95% 时的焦斑半径,  $N_{sg}$  值是焦斑能量分布曲线逼近理想超高斯焦斑{其强度表达式为  $I_{sg} = \exp\{-\ln(100) * [(x_o/w_a)^2 + (y_o/w_b)^2]^{N_{sg}}\}$ ,  $w_a$  和  $w_b$  为半长轴和半短轴}分布曲线的阶数,它反映了整形焦斑的陡边性能。  $P_{FOPAI}$  和  $\delta_{RMS}$  反映焦斑的均匀性,一般要求超过 5 倍平均光强的功率份额(即  $P_{FOPAI5}$ ) 小于 10%,因为 CPP 与光谱色散匀滑(SSD)联用,SSD 能匀滑 10~40  $\mu\text{m}$  中高频,因此计算  $\delta_{RMS}$  时先对焦斑进行 30  $\mu\text{m}$  滤波。  $\eta_s$  反映光束穿孔能力,穿孔实验要求焦斑无明显旁瓣,要求  $\eta_s$  越小越好。

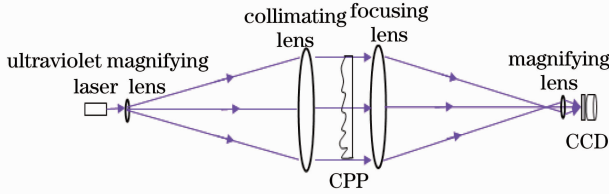
### 2.2 CPP 焦斑离线测试系统

CPP 三倍频远场光强测试系统的简化光路如

图 1 所示,激光器发出的紫外激光经过放大准直为平行光束,穿过被测元件(CPP 和畸变波前元件),再经聚焦透镜后得到焦斑,最后经放大成像在 CCD 中。光源采用连续紫外固体激光器,输出激光具有高斯形分布,波长为 351 nm,与大型激光装置的三倍频激光波长一致。准直透镜和聚焦透镜的口径均为  $\Phi 600$  mm,焦距为 4 m,可检测元件最大尺寸为

圆形  $\Phi 600$  mm 和方形  $430$  mm $\times$  $430$  mm 的大口径光学元件。为提高检测结果的准确性,从几方面进行系统优化:1)优化光学系统设计和元件精密装调精度,尽量减小系统像差;2)提高系统组件的精度,如大口径准直和聚焦透镜的加工透射面形峰谷(PV)值优于  $1/4$  波长(波长为 632.8 nm)。

(a)



(b)

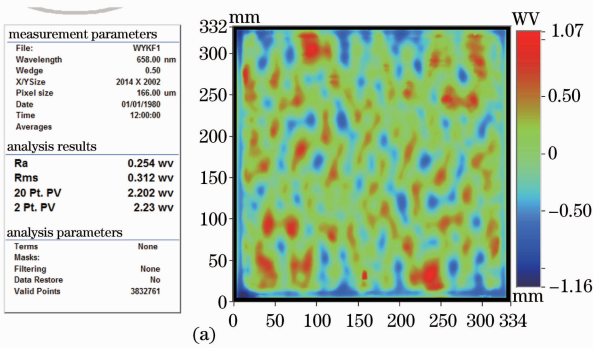
图 1 测试系统简化光路及照片。(a)光路;(b)照片

Fig. 1 Simplified beam path and photo of the measurement system. (a) Beam path; (b) photo

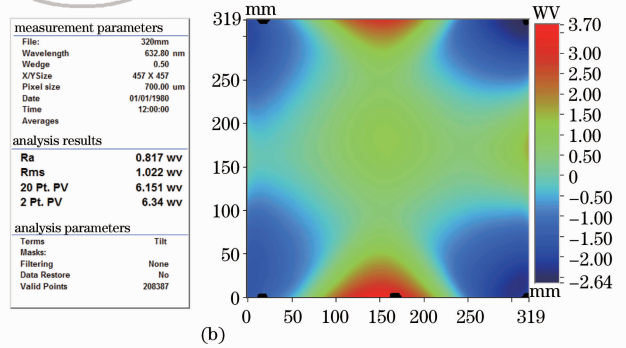
为了验证计算模型和焦斑测试系统,实验采用口径为  $330$  mm $\times$  $330$  mm 的 CPP,产生  $546 \mu\text{m}\times 313 \mu\text{m}$  ( $78.0 V_{DL}\times 44.7 V_{DL}$ )椭圆焦斑,入射的波前畸变由一块  $330$  mm $\times$  $330$  mm 的初抛平面元件产生,分别测试得到其面形分布如图 2 所示,该波前畸变产生的弥散斑大小为  $39.2 V_{DL}$  (约为 0.5 倍 CPP 焦斑)。

另一种为同时加 CPP 和波前畸变。入射光场为理想高斯分布,忽略系统像差的影响,可认为计算和实验的输入条件相同。通过比较添加波前畸变前后的焦斑性能差异来研究其影响,并且,理论和实验的对比分析可进一步验证理论计算的正确性和实验系统的可靠性。

计算和实验均分两种情况:一种为仅加 CPP;



(a)



(b)

图 2 用于测试的 CPP 透射面形和畸变波前面形。(a) CPP; (b)波前畸变

Fig. 2 Transmission wavefront of the CPP and the wavefront distortion for experiment. (a) CPP; (b) wavefront distortion

### 3 结果与分析

将测试 CPP 面形和波前畸变面形加入计算模型和实验系统分别得到焦斑如图 3 所示,图 3(a)和图 3(b)为计算添加波前畸变前后的 CPP 焦斑图,图 3(c)和图 3(d)为离线实验得到的添加波前畸变前后的 CPP 焦斑图。为便于观察,对焦斑图进行  $30 \mu\text{m}$  低通滤波后分别得到焦斑包络如图 4 所示。图示结果说明计算和实验的焦斑形貌非常吻合。对

焦斑计算得到其能量分布曲线对比图如图 5 所示,添加波前畸变前后的计算和实验的能量曲线非常吻合。可见,波前畸变对 CPP 焦斑形貌有较大破坏作用,它不仅扩大焦斑尺寸,而且破坏其均匀性。

根据前面焦斑参数定义,进一步对焦斑进行定量分析,分别计算得到焦斑性能参数如表 1 所示,根据这些参数分析计算与实验的差异以及波前畸变的影响。

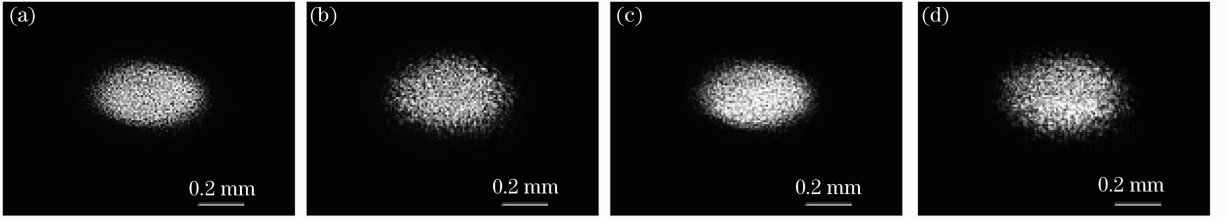


图 3 添加波前畸变前后理论计算和离线测试的焦斑。(a)计算的添加畸变前焦斑;(b)计算的添加畸变后焦斑;  
(c)实测的添加畸变前焦斑;(d)实测的添加畸变后焦斑

Fig. 3 Calculated and measured focal spots with and without wavefront distortion. (a) Calculated focal spot without wavefront distortion; (b) calculated focal spot with wavefront distortion; (c) measured focal spot without wavefront distortion; (d) measured focal spot with wavefront distortion

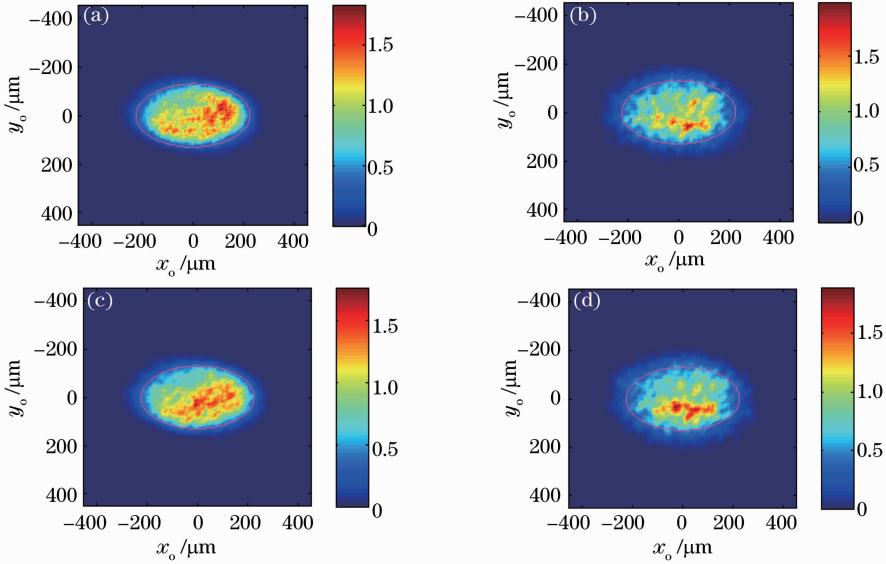


图 4 添加波前畸变前后理论计算和离线测试的焦斑包络(30  $\mu\text{m}$  低通滤波)。(a)计算的添加畸变前焦斑;  
(b)计算的添加畸变后焦斑;(c)实测的添加畸变前焦斑;(d)实测的添加畸变后焦斑

Fig. 4 Calculated and measured envelopes of focal spot intensity with and without wavefront distortion (30  $\mu\text{m}$  low-pass filter). (a) Calculated focal spot without wavefront distortion; (b) calculated focal spot with wavefront distortion; (c) measured focal spot without wavefront distortion; (d) measured focal spot with wavefront distortion

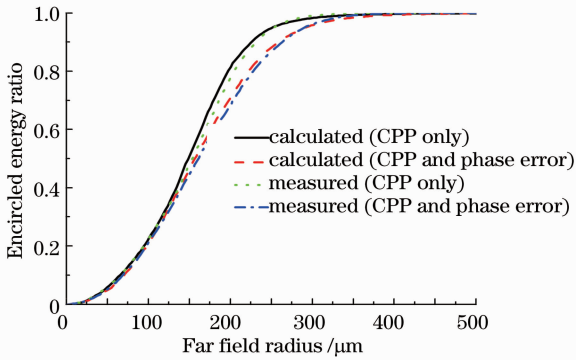


图 5 添加波前畸变前后理论计算和离线测试的能量分布曲线对比图

Fig. 5 Comparison of calculated and measured energy distribution curves with and without wavefront distortion

将添加波前畸变前后两种情况的理论计算和实测焦斑对比,其差异如表 2 所示,差异数值为实测参数与理论计算参数之差。实验与计算的  $\eta$  差异小于 1%,  $R_{80}$ 、 $R_{90}$ 、 $R_{95}$  差异小于 10  $\mu\text{m}$ ,  $N_{\text{sg}}$  差异仅为 0.1 阶,  $\delta_{\text{RMS}}$  差异为 3%,  $\eta_s$  差异均小于 0.3%,  $P_{\text{FOPA15}}$  差异为 7.3% 和 8.2%。除  $P_{\text{FOPA15}}$  外的参数差异均很小,  $P_{\text{FOPA15}}$  差异大是因为是 CCD 曝光时间积分平滑了部分高频强峰值光强,从而降低了实验焦斑的  $P_{\text{FOPA15}}$  值,其他参数差异主要是由于受到实测系统不可避免存在像差、震动等因素的影响。对比结果说明计算和实验结果能够很好吻合,验证了计算模型的正确性和实验系统的可靠性。

将计算和实测焦斑的有无波前畸变进行对比,其差异如表 3 所示,差异数值为有畸变时参数与无

畸变参数之差。理论计算和实测结果基本一致,加入波前畸变后,能量集中度严重下降, $\eta$ 下降大于4%, $R_{80}$ 、 $R_{90}$ 、 $R_{95}$ 增大值大于20  $\mu\text{m}$ ,陡边阶数 $N_{\text{sg}}$ 均下降了1.3阶。在匀滑参数方面,畸变对 $\delta_{\text{RMS}}$ 的破坏较明显, $\delta_{\text{RMS}}$ 下降6%,而由于焦斑扩大降低了强峰值功率份额,其对 $P_{\text{FOPA15}}$ 的影响不明显。波前

畸变也增大了旁瓣份额, $\eta_s$ 增大值超过0.5%。可见,当波前畸变弥散斑为CPP焦斑大小的0.5倍时,畸变已严重破坏了CPP焦斑的整形、匀滑、旁瓣性能,此时性能很难满足物理实验要求,为获得较好的焦斑性能需要优化控制CPP焦斑和波前畸变的大小。

表1 加波前畸变前后计算和测量的CPP焦斑参数对比

Table 1 Comparison of calculated and measured parameters of CPP's focal spot intensity with and without wavefront distortion

Condition	$\eta / \%$	$R_{80} / \mu\text{m}$	$R_{90} / \mu\text{m}$	$R_{95} / \mu\text{m}$	$N_{\text{sg}}$	$P_{\text{FOPA15}} / \%$	$\delta_{\text{RMS}} / \%$	$\eta_s / \%$
Calculated (CPP only)	96.99	197.2	225.9	251.2	3.0	12.3	21.0	0.35
Calculated (CPP and phase error)	92.61	221.9	258.7	292.2	1.7	11.8	27.0	0.91
Measured (CPP only)	97.51	204.4	231.4	252.6	2.9	4.1	24.0	0.11
Measured (CPP and phase error)	92.21	227.7	263.3	290.6	1.6	4.5	30.0	0.71

表2 理论计算与实验焦斑参数差异对比

Table 2 Comparison of calculated and measured parameter differences of CPP's focal spot intensity

Condition	$\Delta\eta / \%$	$\Delta R_{80} / \mu\text{m}$	$\Delta R_{90} / \mu\text{m}$	$\Delta R_{95} / \mu\text{m}$	$\Delta N_{\text{sg}}$	$\Delta P_{\text{FOPA15}} / \%$	$\Delta\delta_{\text{RMS}} / \%$	$\Delta\eta_s / \%$
CPP only	0.52	7.2	5.5	1.4	-0.1	-8.2	3	-0.24
CPP and phase error	-0.4	5.8	4.6	-1.6	-0.1	-7.3	3	-0.2

表3 加波前畸变前后焦斑参数差异对比

Table 3 Comparison of the parameter differences of CPP's focal spot intensity with and without wavefront distortion

	$\Delta\eta / \%$	$\Delta R_{80} / \mu\text{m}$	$\Delta R_{90} / \mu\text{m}$	$\Delta R_{95} / \mu\text{m}$	$\Delta N_{\text{sg}}$	$\Delta P_{\text{FOPA15}} / \%$	$\Delta\delta_{\text{RMS}} / \%$	$\Delta\eta_s / \%$
Calculated	-4.38	24.7	32.8	41	-1.3	-0.5	6	0.56
Measured	-5.3	23.3	31.9	38	-1.3	0.4	6	0.6

## 4 结 论

根据大型激光装置对CPP焦斑性能的要求,建立波前畸变下CPP焦斑计算和分析模型,并针对CPP实际应用建立三倍频远场焦斑测试系统,分别从理论和实验两方面研究了波前畸变对CPP焦斑的影响。理论计算和离线测试焦斑性能参数的定量对比分析表明,在存在波前畸变时系统焦斑主要由加工CPP焦斑和波前畸变弥散斑的卷积得到。波前畸变对CPP焦斑的影响非常严重,弥散斑为0.5倍CPP焦斑的畸变量已对焦斑产生了不可容忍的变化:焦斑扩大,能量利用率下降值大于4%, $R_{80}$ 、 $R_{90}$ 、 $R_{95}$ 增大值超过20  $\mu\text{m}$ ,陡边阶数 $N_{\text{sg}}$ 下降1.3阶;均匀性变差, $\delta_{\text{RMS}}$ 下降6%,由于焦斑扩大降低了强峰值功率份额,其对 $P_{\text{FOPA15}}$ 的影响不明显;增大了旁瓣份额, $\eta_s$ 增长超过0.5%。因此,为了提高CPP性能参数,应该通过控制加工误差和装调误差、采用相位补偿等技术进一步控制波前畸变大小。该计算模型、离线测试系统及分析方法为今后具体物理需求下CPP焦斑的波前畸变容差分析和大型激光驱动系统的设计提供重要的参考依据。

## 参 考 文 献

- 1 G Brumfiel. Laser lab shifts focus to warheads [J]. Nature, 2012, 491(7423): 170-171.
- 2 J D Lindl, P Amendt, R L Berger, *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility [J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(2): 339-491.
- 3 D H Froula, L Divol, R A London, *et al.*. Experimental basis for laser-plasma interactions in ignition hohlraums at the National Ignition Facility [J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(5): 056302.
- 4 S N Dixit, M D Feit, M D Perry, *et al.*. Designing fully continuous phase screens for tailoring focal-plane irradiance profiles [J]. Opt Lett, 1996, 21(21): 1715-1717.
- 5 J A Marozas. Fourier transform-based continuous phase-plate design technique: a high-pass phase-plate design as an application for OMEGA and the National Ignition Facility [J]. J Opt Soc Am A, 2007, 24(1): 74-83.
- 6 Wen Shenglin, Xu Qiao, Ma Ping, *et al.*. Process-based design of continuous phase plates [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3179-3182.  
温圣林, 许乔, 马平, 等. 基于工艺连续相位板设计[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3179-3182.
- 7 J A Menapace, P J Davis, W A Steele, *et al.*. MRF applications: on the road to making large-aperture ultraviolet laser resistant continuous phase plates for high-power lasers [C]. SPIE, 2006, 6403: 64030N.
- 8 C A Haynam, P J Wegner, J M Auerbach, *et al.*. National Ignition Facility laser performance status [J]. Appl Opt, 2007, 46(16): 3276-3233.

- 9 J Neauport, X Ribeyre, J Daurios, *et al.*. Design and optical characterization of a large continuous phase plate for laser integration line and laser megajoule facilities [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(13): 2377–2382.
- 10 P Wegner, J Auerbach, T Biesiada, *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning [C]. SPIE, 2004, 5341: 180–189.
- 11 Zhang Rui, Li Ping, Su Jingqin, *et al.*. Experiment research of target uniform illumination using smoothing by spectral dispersion and continuous phase plate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 054204.  
张 锐, 李 平, 粟敬钦, 等. 采用光谱色散平滑和连续相位板实现靶面均匀辐照的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 054204.
- 12 Wen Shenglin, Hou Jing, Yang Chunlin, *et al.*. Design and fabrication of large-aperture continuous phase plates for back lighting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(5): 052201.  
温圣林, 侯 晶, 杨春林, 等. 用于背光照明的大口径连续相位板设计和制作[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(5): 052201.
- 13 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin, *et al.*. Impact of beam aberration on continuous phase plates performance [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(5): 1059–1064.  
李 平, 马 驰, 粟敬钦, 等. 光束畸变对连续相位板性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(5): 1059–1064.
- 14 M Born, E Wolf. *Principles of Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 359–366.

栏目编辑: 李志兰