

惯性约束聚变驱动装置中焦斑整形的 自适应光学方法

王德恩 胡东霞 代万俊 李 平 赵军普 景 峰 李小群

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 针对惯性约束聚变(ICF)驱动装置,提出一种新的焦斑整形方法:基于衍射叠加原理,采用自适应光学(AO)技术调整近场相位来实现对远场焦斑形态的控制。以一种新型的变形镜模型——压电薄膜变形镜(PFDM)为例,对 AO 技术用于焦斑整形的可行性进行了模拟研究。结果表明,在制作工艺允许的范围内,当变形镜的空间分辨率达到一定程度时,便可利用 AO 技术实现良好的焦斑整形效果,而且能够保证焦斑较好的均匀性。进一步研究结果表明,该方法对波前畸变的容忍度要优于传统方法。

关键词 激光器;自适应光学;焦斑整形;压电薄膜变形镜;动态连续相位板

中图分类号 TL632⁺.1; TP273⁺.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0312002

Far Field Irradiance Profile Control in Inertial Confinement Fusion Drive Facility with Adaptive Optics

Wang De'en Hu Dongxia Dai Wanjun Li Ping Zhao Junpu Jing Feng Li Xiaoqun
(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract A novel method based on diffraction theory with adaptive optics to control far field irradiance profile in inertial confinement fusion device is proposed. Taking piezoelectricity film deformable mirror for example, the probability of this method used in profile control is studied. The results show that adaptive optics technique can be used to control the far-field intensity profile and uniformity easily by deformable mirror with high spatial resolution. In addition, more simulations show that this method is better than traditional method in the tolerance of wavefront distortion.

Key words lasers; adaptive optics; far-field irradiance profile control; piezo film deformable mirror; dynamic continuous phase plate

OCIS codes 140.3300; 350.5030; 140.3535

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)驱动器对焦斑形态具有特殊的要求^[1]。目前国内外用于焦斑整形的技术主要有随机相位板(RPP)^[2]、相息相位板(KPP)^[3]、分布相位板(DPP)^[4]、连续相位板(CPP)等^[5,6]。但相位板法存在若干问题:1)相位板属于一种静态技术,不同的物理需求需要不同的相位板,这将增加成本和

操作难度;2)相位板会导致光束准直困难,相位板的加入会使准直光在靶孔处呈现一个很大的轮廓,将严重影响准直系统的精度;3)相位板损伤阈值较低。这些问题将极大地限制相位板的实际应用。

自适应光学(AO)技术是一种成熟的相位控制技术^[7~10],其最大的特点在于高度的灵活性。早在 20 世纪 90 年代,国内外便有采用 AO 技术进行焦

收稿日期: 2010-09-07; **收到修改稿日期**: 2010-10-27

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2009A0401023)资助课题。

作者简介: 王德恩(1986—),男,硕士研究生,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: sduwde@126.com

导师简介: 李小群(1952—),男,研究员,主要从事高功率固体激光装置电气控制方面的研究。

E-mail: lixiaoqun229@163.com

斑整形的报道^[11~14],如曾志革等^[15,16]利用 37 单元的变形镜进行了焦斑整形的实验研究,获得了较好的实验结果。但上述大部分报道都是基于几何光学原理,这种方法获得的近场波前为低频,因此需要较少的驱动器数目,但焦斑与近场之间存在点对点关系,近场的瑕疵会在远场明显体现出来,且微小的离焦量(约为 10^{-1} mm)便会引起焦斑轮廓的较大变化,其容忍度和实际可操作性均较差。

针对 ICF 驱动器的特殊要求,本文提出了采用自适应光学技术,基于衍射叠加原理进行焦斑整形的方法,建立了一种新型变形镜——压电薄膜变形镜(PFDM)的数学模型,通过 G-S 算法恢复了特定焦斑形态下的近场相位,研究了不同电极数目的压电薄膜变形镜对远场焦斑分布的控制情况,理论上说明了 AO 技术用于焦斑整形的可行性。这里将能够实现良好焦斑整形效果的变形镜称为动态连续相位板(DCPP),并且在存在波前畸变的情况下对比研究了 DCPP 和传统 CPP 的整形能力。

2 理论基础

2.1 相位恢复算法

目前常用的相位恢复算法有 G-S 算法^[17]、杨-顾算法、模拟退火算法、遗传算法等,其中 G-S 算法因能够充分发挥快速傅里叶变换(FFT)的优势,节省计算时间,而得到普遍应用。这里采用 G-S 算法进行相位恢复。

图 1 为 G-S 算法的流程图^[6]。具体过程如下:

1) 初始变量选取:初始振幅 E_{in} 选为 8 阶超高斯分布,初始近场相位 φ_{in} 为连续随机分布。目标振幅 E_{obj} 的选取与焦斑的目标轮廓有关。

2) 利用快速傅里叶算法实现输入近场到远场的计算

$$U_{ff} = E_{ff} \exp(i\varphi_{ff}) = \mathcal{F}_F[E_{in} \exp(i\varphi_{in})]. \quad (1)$$

将远场振幅 E_{ff} 替换为目标振幅 E_{obj} ,相位保持不变,再通过逆傅里叶变换得到近场光场分布

$$U_{nf} = E_{nf} \exp(i\varphi'_{nf}) = \mathcal{F}_F^{-1}[E_{obj} \exp(i\varphi_{ff})]. \quad (2)$$

3) 近场相位 φ'_{nf} 经过滤波和消 2π 跳变处理得到 φ_{nf} ,将计算得到的近场振幅 E_{nf} 替换为输入振幅 E_{in} ,再进行傅里叶变换得

$$U_{ff} = E_{ff} \exp(i\varphi_{ff}) = \mathcal{F}_F[E_{in} \exp(i\varphi_{nf})]. \quad (3)$$

4) 以 σ_{ff} 作为算法收敛判断条件,重复 2), 3) 步骤,直至达到目标要求。 σ_{ff} 为 E_{obj} 与 E_{ff} 的均方根(RMS)差值,其定义为

$$\sigma_{ff} = \sqrt{\frac{\iint [E_{obj}(x_{ff}, y_{ff}) - E_{ff}(x_{ff}, y_{ff})]^2 dx_{ff} dy_{ff}}{\iint [E_{obj}(x_{ff}, y_{ff})]^2 dx_{ff} dy_{ff}}}. \quad (4)$$

这里需要说明的是,收敛的判断条件很难精确给出,数值模拟过程以 0.3 作为判断条件,当 $\sigma_{ff} \leq 0.3$ 时,便认为算法已经收敛。一般来讲,收敛时迭代次数在 300 次以内。

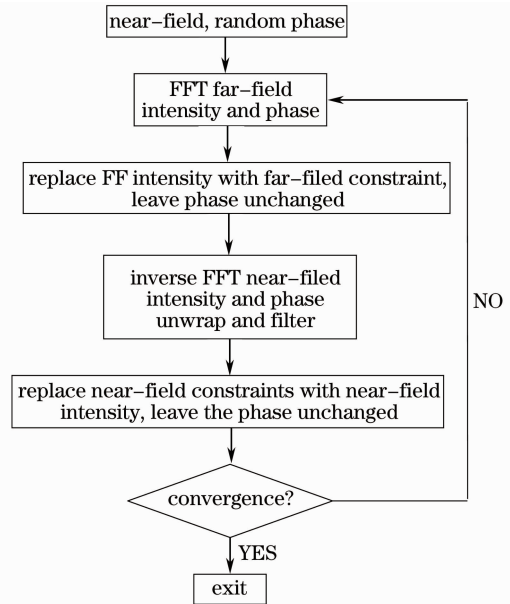


图 1 G-S 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of G-S algorithm

2.2 变形镜的数学模型

针对焦斑整形方法,并结合 ICF 驱动装置光束口径的特殊要求,需要一种大口径、高空间分辨率的变形镜(DM)。在众多种类的变形镜中,双压电片变形镜是一种容易做到大口径、高空间分辨率的变形镜^[18,19],因此采用该变形镜模型。压电薄膜变形镜工作原理与传统双压电片变形镜相同,只是在结构上略有不同,只有一层压电陶瓷片,结构如图 2 所示。为适应 ICF 光束口径的需求,压电薄膜变形镜的口径设为方形,尺寸为 $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$,电极也设为方形,边缘间距为 1 mm ,数量及尺寸可调。图 2(b)中虚线为实际的光束使用口径 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$ 。该类变形镜机电行为方程可用 $\nabla^4 W + A \nabla^2 V = 0$ 来描述^[20],通过傅里叶级数法可以求解该方程^[21],得到

$$W(x, y) = \frac{16AV_0}{\pi^4} G, \quad (5)$$

式中

$$G = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{mn(n^2/a^2 + m^2/b^2)} \sin \frac{x_0 n \pi}{a} \sin \frac{pn \pi}{2a} \sin \frac{y_0 m \pi}{b} \sin \frac{qm \pi}{2b} \sin \frac{n \pi x}{a} \sin \frac{m \pi y}{b} \right],$$

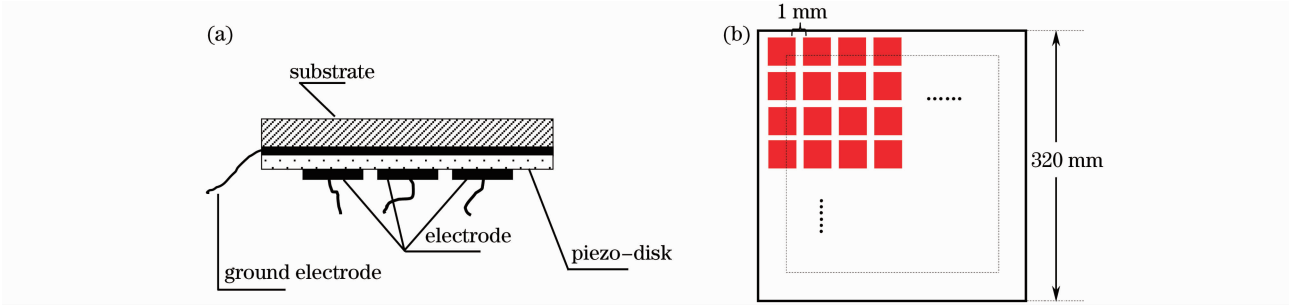


图 2 压电薄膜变形镜。(a)结构示意图,(b)电极排布示意图

Fig. 2 Model of PFDM. (a) structure schematic, (b) actuator distribution schematic

$W(x, y)$ 为镜面面形, A 是与衬底层和压电层材料有关的常数, V_0 为电极所加电压的大小。参数 G 中, a 为变形镜长, b 为变形镜宽, (x_0, y_0) 为电极中心坐标, p 为电极长, q 为电极宽, 数值模拟过程中, m, n 的最大值取到 15 便可以满足误差要求。

2.3 远场评价参数

定义实际焦斑与目标焦斑的 RMS 差值 e_k , 用来描述焦斑轮廓相似性, 该值越小, 说明实际焦斑与目标焦斑轮廓相似度越高, 表达式为

$$e_k = \sqrt{\sum_x \sum_y [I_{\text{target}}(x, y) - I_{\text{actual}}(x, y)]^2}, \quad (6)$$

式中 I_{target} 为目标远场光强分布, I_{actual} 为变形镜产生的近场波前所对应的远场光强分布。

ICF 过程中, 必须尽可能实现靶面均匀辐照, 因此焦斑均匀性也是评价 ICF 驱动装置性能的一个重要指标。在间接驱动方式中, 一般以超过概率密度的统计曲线 (FOPAI) 来描述焦斑的均匀性^[22]。FOPAI 值的定义为

$$V_{\text{FOPAI}}(n, I_0) = \frac{\iint_{I(x, y) \geq nI_0} I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad (n \geq 0) \quad (7)$$

式中 I_0 代表光斑区域内的平均光强, n 为大于 0 的数, 代表平均光强的倍数。 n 取大于 0 的数时, 所有的 FOPAI 值随 n 变化的曲线称为 FOPAI 曲线, 其意义是直观地描述 nI_0 以上的光强占总光强的份额。

3 数值模拟分析

3.1 初始变量选取及相位恢复

初始输入光束口径设置为 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$,

振幅为理想的 8 阶超高斯分布, 透镜焦距为 2.2 m , 以上参数的选取与原型装置相匹配。

目标远场设置为 $2:1$ 的椭圆, 大小为 $1000 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$, 记为“目标焦斑”, 如图 3 所示。采用 G-S 算法恢复的波前如图 4(a) 所示, 其峰谷 (PV) 值为 4λ ($\lambda = 1053 \text{ nm}$), RMS 值为 0.73。波前的一维功率谱密度 (PSD) 谱线分布如图 4(b) 所示, 从该图中可以看出波前的成分主要集中在虚线左侧, 即 0.3 mm^{-1} 以下, 这主要是因为 G-S 相位恢复算法中加入了截止频率为 30 mm^{-1} 的滤波器, 为下面合理选取变形镜的电极密度提供了一定的依据。

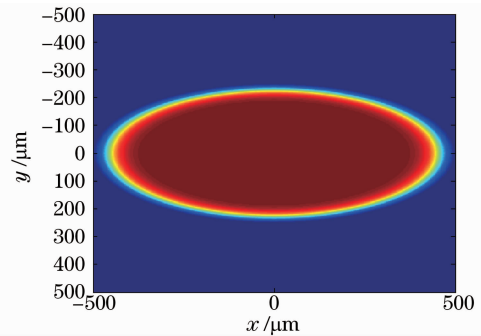


图 3 理想的目标远场

Fig. 3 Ideal target of far-field

在前面提到的理想输入振幅情况下, 附加计算得到的波前归一化远场记为“初始焦斑”, 是在采用变形镜模拟过程中试图实现的目标焦斑, 分布如图 5 所示。从图 5(a), (b) 中可以看出, 远场呈现出较好的椭圆轮廓, 与目标焦斑间的 RMS 差值为 0.2452, 且椭圆尺寸达到了 $1000 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的要求。

3.2 完美平面波入射的情况

首先假定入射光束为理想的平面波, 为保证变形镜对波前边缘的拟合能力, 变形镜口径选为 $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$, 光束口径为 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$,

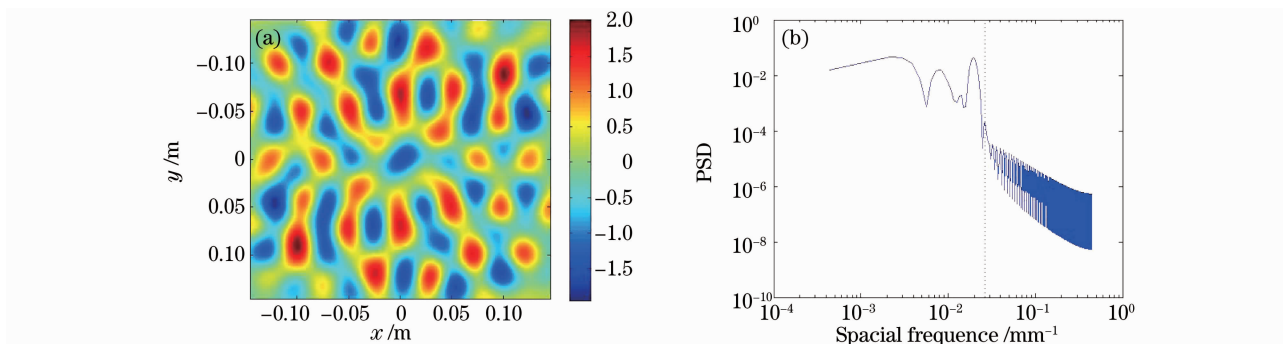


图 4 G-S 算法恢复近场波前。(a)波前分布,(b)波前对应的功率谱密度谱线

Fig. 4 Near-field wavefront recovered by G-S algorithm. (a) distribution of wavefront, (b) PSD curve of the wavefront

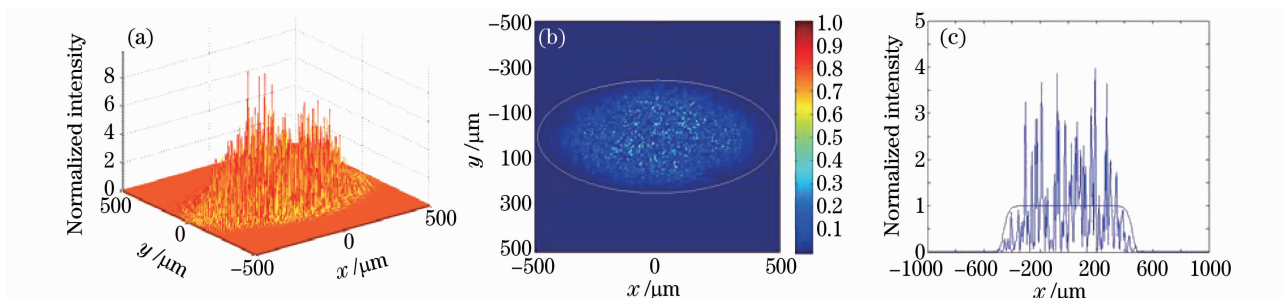


图 5 归一化远场分布。(a)远场三维分布,(b)远场二维分布,(c)远场沿椭圆长轴方向的一维分布

Fig. 5 Normalized far-field distribution. (a) 3D display, (b) 2D display, (c) 1D distribution along major axis of ellipse

变形镜实际使用口径约为总口径的 90%。从上面的分析可知,近场相位的空间频率主要集中在 0.3 mm^{-1} 以下,为保证变形镜对该波前的拟合能力,在选择变形镜电极排布时,应使电极间距不高于 30 mm。因此,对变形镜电极数目分别为 12×12 , 14×14 , 16×16 , 18×18 和 20×20 的几种情况进行了研究,光束传输如图 6 所示。

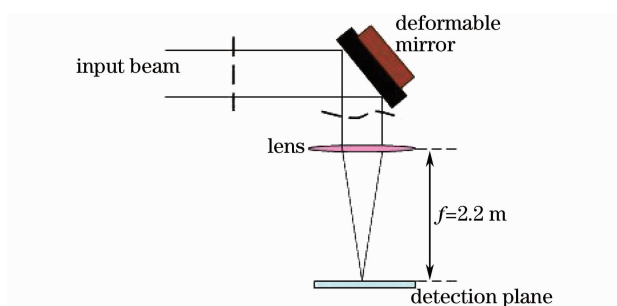


图 6 光束传输示意图

Fig. 6 Propagation scheme of the laser beam

输入光束经变形镜表面反射改变波前,然后经透镜聚焦,在探测平面上观察远场信息。因光束反射,变形镜只需拟合 $1/2$ 波前。在不同电极数目的情况下,得到实际焦斑与“目标焦斑”的 RMS 差值变化如表 1 所示。

表 1 目标焦斑与实际焦斑的 RMS 差值

Table 1 RMS error between target and actual focal profiles

Actuator number	12×12	14×14	16×16	18×18	20×20
RMS value	0.537	0.398	0.3057	0.2577	0.2533

从表 1 中可以看到当电极数目增加到 18×18 时,RMS 差值降为 0.2577 左右,与所计算的“初始焦斑”与“目标焦斑”的 RMS 差值 0.2452 比较接近。

焦斑轮廓变化可以从远场的二维视图中更直观地反映出来,如图 7 所示,远场二维的轮廓随变形镜电极数目增加逐渐接近椭圆,在电极数目增加到 18×18 时,焦斑轮廓便已呈现出较好的椭圆形态。

图 8 给出了不同电极数目下远场焦斑的 FOPAI 曲线,横坐标 $n = I/I_0$ 代表平均光强的倍数,纵坐标为焦斑光强中大于 I 的部分所占份额。从图 8 中可以看出,随着电极数目的增加,焦斑的均匀性逐渐变好,电极数目为 18×18 , 20×20 时与“初始焦斑”的 3 条 FOPAI 曲线非常接近。因此,若从均匀性方面分析, 18×18 变形镜的效果已经与“初始焦斑”相接近,电极数的增加对均匀性改进不大。在实际应用中,结合谱色散匀滑(SSD)技术对焦斑均匀性做进一步提升。

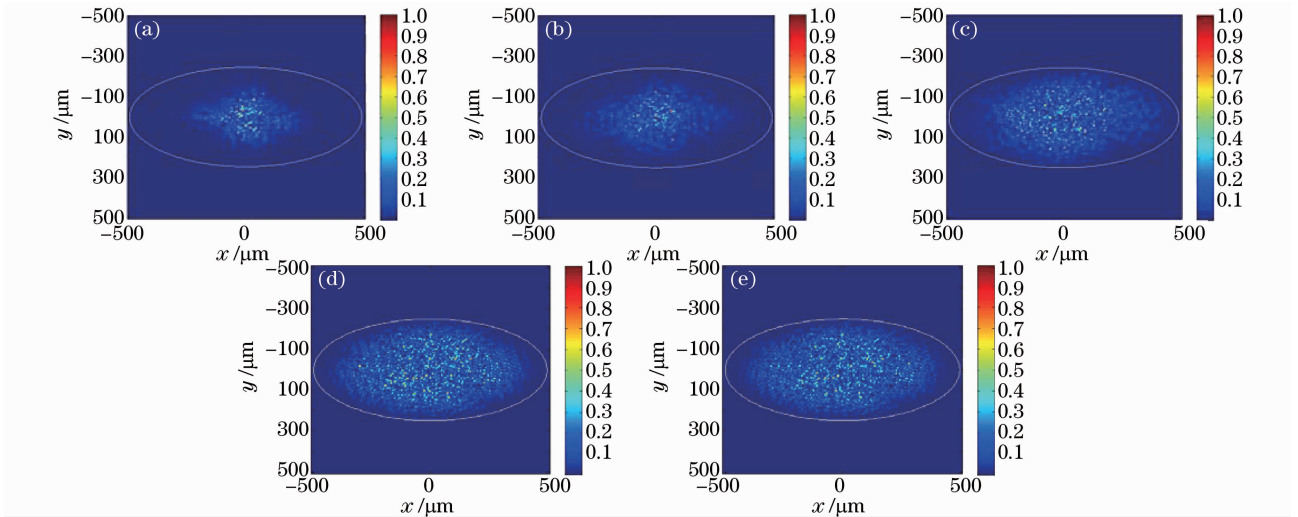


图7 不同电极数目变形镜的控制效果。(a)电极数目为 12×12 , (b)电极数目为 14×14 , (c)电极数目为 16×16 , (d)电极数目为 18×18 , (e)电极数目为 20×20

Fig. 7 Control effect of DMs with different actuator number. (a) 12×12 actuators, (b) 14×14 actuators, (c) 16×16 actuators, (d) 18×18 actuators, (e) 20×20 actuators

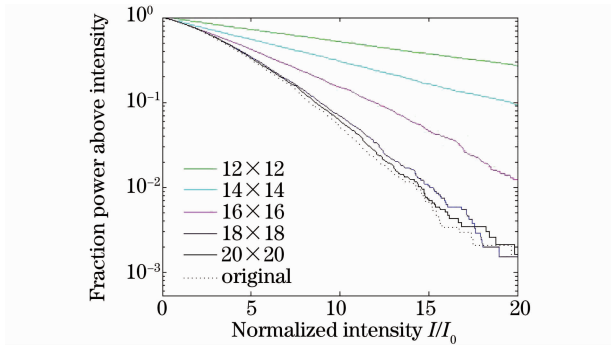


图8 不同电极数目下远场焦斑的 FOPAI 曲线
Fig. 8 FOPAI curves of far-field with different electrode number

由分析可知,变形镜的焦斑整形能力随电极数目的增加而变强。对于 $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ 口径的变形镜,基于焦斑轮廓以及焦斑均匀性综合考虑,当电极数目增加到 18×18 时,压电薄膜变形镜便已经具备了较好的焦斑整形能力,且能够保证一定的均匀性。在此将具备良好焦斑整形能力的变形镜称为动态连续相位板。

3.3 存在波前畸变的情况

实际入射光束并非完美的平面波,波前必然存在畸变。在上述讨论的基础上,利用 18×18 单元变形镜研究入射光束存在波前畸变的情况。ICF 驱动器中波前畸变以低频为主,随机生成低频畸变波前如图 9 所示, PV 值为 5.1λ , 在波前上附加波前畸变后,对应远场焦斑的二维分布如图 10(a)所示,可以看到焦斑形态产生了一定畸变,焦斑边缘毛刺增多,椭圆轮廓遭到破坏。这正是采用传统 CPP 时的情况,

虽然其对波前畸变具有一定的容忍度,但无法彻底消除不利影响。

若采用动态 CPP,则对应远场二维图像如图 10(b)所示,可以看到焦斑轮廓仍然保持较好的椭圆。对比两种情况下的 FOPAI 曲线,DCPP 在均匀性控制方面要略好于传统 CPP。总之,相对于传统 CPP,DCPP 对波前畸变的容忍度更好。

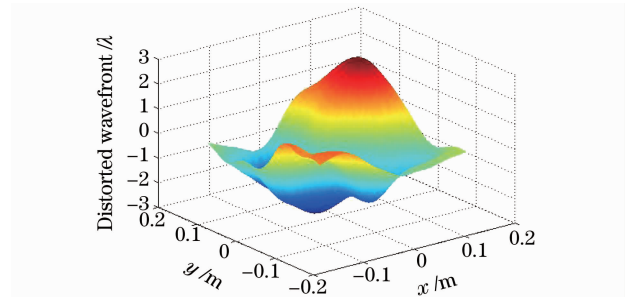


图9 低频畸变波前

Fig. 9 Distorted wavefront of low spatial frequency

4 结 论

焦斑整形是 ICF 驱动器技术中的重要研究内容之一,传统的相位板法具有静态、影响准直效率、损伤阈值低等若干局限性。在已有的利用 AO 技术基础上,基于几何光学原理进行焦斑整形方法的若干缺陷,提出了利用 AO 技术,基于衍射叠加原理进行焦斑整形的方法,以新型的压电薄膜变形镜作为研究对象,对该方法的可行性做了细致的分析。研究表明,在 $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$ 口径下,当压电薄膜变形镜的驱动单元数达到 18×18 或以上时,其

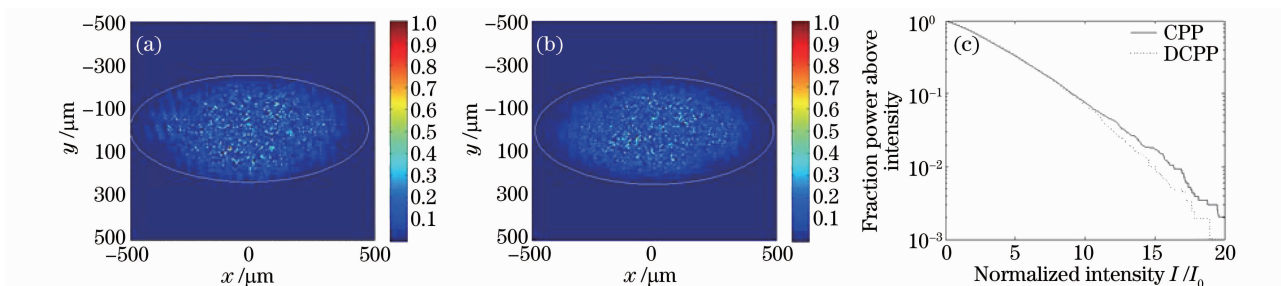


图 10 焦斑整形效果对比。(a)CPP 效果,(b)动态 CPP 效果,(c)FOPAI 曲线对比

Fig. 10 Comparison of profile control effect. (a) effect of CPP, (b) effect of DCPP, (c) comparison of FOPAI

已具备了良好的焦斑整形能力,且能够保证较好的远场均匀性,将这种能够实现良好焦斑整形效果的变形镜称为 DCPP。

相对于传统 CPP,DCPP 具有更好的适应性,可随物理需求做相应改变,不会对系统造成负面影响。如光束准直时,具有更好的波前畸变容忍度、高损伤阈值等优点。18×18 单元压电薄膜变形镜电极的中心间距约为 18 mm,在目前的工艺水平下制作该电极密度的压电薄膜变形镜已非难事,为 DCPP 的实用设计提供了可能。

参 考 文 献

1 M. L. Spaeth, K. R. Manes, C. C. Widamayer *et al.*. National ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2854~2865
 2 S. N. Dixit, I. M. Thomas, B. W. Woods *et al.*. Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2543~2554
 3 I. Thomas, S. N. Dixit, M. C. Rushford *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6): 417~419
 4 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal plane irradiance profiles[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 764~771
 5 J. Néauport, 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
 6 John 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
 7 W. J. Dai, D. X. Hu, W. Zhou *et al.*. Beam wavefront control of a thermal inertia laser for inertial confinement fusion application[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3691~3694
 8 Koshichi Nemoto, Takashi Fujii, Naohiko Goto *et al.*. Laser beam intensity profile transformation with a fabricated mirror[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3): 551~557
 9 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Yang Zeping *et al.*. Wavefront closed loop correction for entire beam path of technical integration experiment line[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 414~417
 代万俊, 胡东霞, 杨泽平 等. 神光 III 原型装置全光路像差闭环校正实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 414~417
 10 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei *et al.*. Application of cavity deformable mirror in petawatt facility with U-turn reverser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2920~2923

代万俊, 胡东霞, 周 维 等. 腔镜位置变形镜波前补偿与实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2920~2923
 11 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, 管春林 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
 12 Koshichi Nemoto, Takuya Nayuki, Takashi Fujii *et al.*. Optimum control of the laser beam intensity profile with a deformable mirror[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30): 7689~7695
 13 R. El-Agmy, H. Bulte, A. H. Greenaway *et al.*. Adaptive beam profile control using a simulated annealing algorithm[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6085~6091
 14 Koshichi Nemoto, Takashi Fujii, Naohiko Goto *et al.*. Transformation of a laser beam intensity profile by a deformable mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 168~170
 15 Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Controlling focal profile of He-Ne laser beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(4): 581~586
 曾志革, 凌 宁, 姜文汉. He-Ne 激光束的焦斑形态控制[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(4): 581~586
 16 Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Investigation of fitting capability of active mirror for controlling ICF's focal profile[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(1): 1~5
 曾志革, 凌 宁, 姜文汉. 用于 ICF 焦斑形态控制的能动反射镜拟合波面能力研究[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(1): 1~5
 17 Yu Hao, Huang Linhai, Rao Changhui *et al.*. Application of G-S algorithm to the control of beam near-field intensity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1259~1264
 余 浩, 黄林海, 饶长辉 等. G-S 算法在光束近场强控制中的应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1259~1264
 18 Ning Yu, Yu Hao, Zhou Hong *et al.*. Performance test and closed-loop correction experiment of a 20-element bimorph deformable mirror [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(7): 4717~4723
 宁 禹, 余 浩, 周 虹 等. 20 单元双压电片变形镜的性能测试与闭环校正实验研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(7): 4717~4723
 19 Ning Yu, Zhou Hong, Guan Chunlin *et al.*. Finite element analysis and measurement of a 20-element bimorph deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1638~1642
 宁 禹, 周 虹, 官春林 等. 20 单元双压电片变形反射镜的影响函数有限元分析和实验测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1638~1642
 20 S. Ehd, S. G. Lipson. Bimorph piezoelectric flexible mirror [J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1979, **69**(3): 478~481
 21 P. Halevi. Bimorph piezoelectric flexible mirror: graphical solution and comparison with experiment[J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1983, **73**(1): 110~113
 22 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303