

针对离焦曲面均匀辐照的连续相位板设计

黄德权¹ 温圣林² 赵曦¹ 张超¹ 姚欣¹ 高福华¹

(¹ 四川大学高能量密度物理与技术教育部重点实验室, 四川 成都 610064)
² 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要 提出一种针对光强接收面为离焦曲面的连续相位板(CPP)的设计方法,该方法改进了传统的 Gerchberg-Saxton (GS)迭代算法,不再以焦面作为设计目标,在每一次的迭代过程中都考虑实际离焦的影响,以离焦面作为设计目标;同时为了解决曲面设计问题,提出修正重构离焦面上的目标光强函数的方法。模拟计算表明,新的连续相位板设计方法,相对于以焦面作为设计目标的传统方法,可以很好地控制离焦曲面上的焦斑轮廓,得到很高的能量集中度,可满足惯性约束聚变对束匀滑元件相位连续性、光斑包络及能量集中度的要求,较好地解决了离焦曲面上的束匀滑问题。

关键词 光学设计;连续相位板;离焦曲面;改进 Gerchberg-Saxton 算法;惯性约束聚变

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s116003

Design of Continuous Phase Plates for Uniform Illumination on a Out-of-Focus Curved Surface

Huang Dequan¹ Wen Shenglin² Zhao Xi¹ Zhang Chao¹ Yao Xin¹ Gao Fuhua¹

(¹ Key Laboratory for High Energy Density Physics and Technology, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China
² Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract A new method of designing continuous phase plates (CPP) for beam smoothing has been studied. The new CPP is applied when the diffraction field is a out-of-focus and curved surface. The traditional Gerchberg-Saxton (GS) algorithm is improved. During algorithm's each iteration, the out-of-focus plane is regarded as design goal instead of focal plane. And the objective function for compensating the impact of cuned surface is reansomcted. The simulation has proved that the new CPP can control the envelope of focal spot on the out-of-focus curved surface well and obtain high energy concentration, so the demand of the distribution continuity for beam smoothing element, good profile of the target beam and high energy concentration in inertial confinement fusion can be satisfied simultaneously by this algorithm.

Key words optical design; continuous phase plates; out-of-focus curved surface; modified Gerchberg-Saxton algorithm; inertial confinement fusion

OCIS codes 220.2560; 350.5030; 350.2660

1 引言

为了实现点火,惯性约束聚变(ICF)系统对于辐照场的能量集中度和均匀性有着苛刻的要求,连续相位板(CPP)具有能量利用率高、焦斑形态易于

控制等优点^[1,2],是 ICF 驱动系统中实现光束整形和匀滑的重要元件。

国内外对 CPP 已经做了许多研究,取得了许多进展,但是主要是针对光接收面在聚焦透镜的焦面

收稿日期: 2011-07-30; **收到修改稿日期**: 2011-08-30

基金项目: 高等学校科技创新工程重大项目培育资金资助课题。

作者简介: 黄德权(1986—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光传输方面的研究。E-mail: huangdq117@163.com

导师简介: 高福华(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事强激光技术和微纳光子技术等方面的研究。

E-mail: gaofuhua@scu.edu.cn(通信联系人)

上设计的^[1~4],而且透镜的焦点在靶腔的侧面开口处。但是在实际的 ICF 系统中,对于间接驱动方式,很多的激光束以不同的角度通过圆柱形靶腔的侧面开口倾斜入射靶腔,在靶腔内通过与等离子体的相互作用,在靶丸周围形成均匀的辐照场。因此实际的光接收面不再是焦平面,而是有着不同倾斜角度的圆柱面,它们是一系列相对于光传输方向的离焦曲面。

如果对于不同角度的激光束都直接采用针对焦面设计的 CPP 进行光束整形,在实际离焦接收面上的焦斑形状将变坏,得不到需求的均匀辐照场,影响打靶效果。所以十分有必要研究离焦情况下,并且光强接收面为倾斜圆柱面的 CPP 设计新方法。新方法的核心是两个方面的:离焦和曲面。考虑到在进行光传输计算时,对于光接收面为曲面时,要得到曲面上准确的光场分布,计算十分复杂。本文在改进的 GS 迭代算法^[5]中,以离焦面作为设计目标平面,在每一次的迭代过程中都考虑离焦的影响,首先解决离焦问题;同时由于没有以实际的曲面作为设计目标面,那么在迭代过程中必须考虑以离焦平面代替离焦曲面的影响,采用修正离焦平面上目标函数的办法。新的 CPP 设计方法不仅能够较好地解决离焦曲面上的光束匀滑问题,而且具有快速收敛的优点。

2 原 理

ICF 间接驱动的终端可以简单地描述为如图 1 所示,经过 CPP 调制的激光束,通过聚焦透镜,入射到靶腔内,在靶腔壁上形成均匀的辐照场,可以看出衍射场是一个相对光传播方向倾斜的圆柱面。

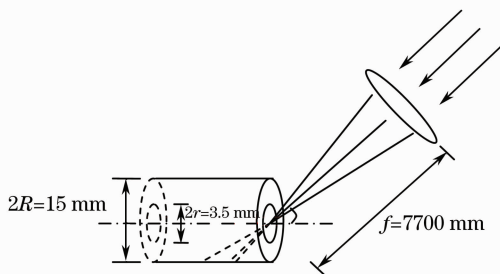


图 1 ICF 靶腔装置示意图

Fig. 1 Device of target hohlraum schematic diagram

为了在离焦的靶腔壁内壁实现均匀辐照,对 CPP 的设计有了更多的要求。考虑到直接曲面光场计算比较复杂,要得到精确的结果需要较多的计算时间。如果在迭代过程中直接把曲面作为设计的

目标,那么每一次迭代都必须计算一次曲面光场,在迭代次数很大时,计算时间将不可接受。所以采用分层的办法,如图 2 所示,设计 CPP 时以图中离焦的 z_2 平面作为目标光强接收面,以解决离焦问题,显然和实际的倾斜圆柱面有差异,通过对目标函数进行修正处理来解决。计算表明相对于传输方向的两个极限平面 z_1 (最近)和 z_3 (最远),由于这两个平面间距不大,经过 CPP 调制的焦斑在 z_1 和 z_3 面之间形态变化不大,以 z_2 平面作为目标光强接收面是合理的。

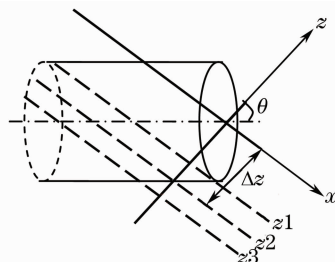


图 2 分层计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of layering calculation

本文在传统 GS 算法的基础上,以控制远场包络为目标,并结合元件的加工工艺和实际应用中使用条件的影响,在迭代过程中加入对相位板和焦斑的控制。由于设计是以离焦的 z_2 面为目标平面,所以在每次迭代过程中必须加入离焦产生的附加相位;在迭代返算回近场前对远场焦斑进行处理时,考虑由于用 z_2 面代替曲面所带来的误差。算法流程如图 3 所示,约定下标的 ff 或 nf 则分别表示远场或近场坐标。

给出了算法第 m 次迭代的全部过程,其中 E_0 为输入归一化场, E_{obj} 为离焦面上的归一化目标场,具体算法的实现参考文献^[1,3,6]。改进算法与传统 GS 算法的改进主要有三点:1) 对迭代得到的近场相位 ϕ'_{cpp} 进行展开^[7] 和滤波,得到相位分布连续,利于加工制作的 ϕ_{cpp} ;2) 对远场焦斑的形态控制,每次的远场迭代目标是根据当次迭代焦斑的包络确定的,用处理后的振幅 E'_{ff} 代替迭代产生的 E_{ff} ,而没有采用目标场 E_{obj} 直接替换 E_{ff} ,处理时还必须考虑用 z_2 面代替曲面的修正。这样处理有利于控制远场的频谱,抑制危险的中频段,保持迭代目标的相关性,使得相邻迭代次数的目标没有太大的改变,反过来降低了近场的相位梯度,同时还解决了曲面设计问题;3) 相位处理时考虑了离焦产生的附加相位 $\phi_{\Delta f}$,把离焦的影响加入到 CPP 的相位分布中,以离焦面作为设计目标。

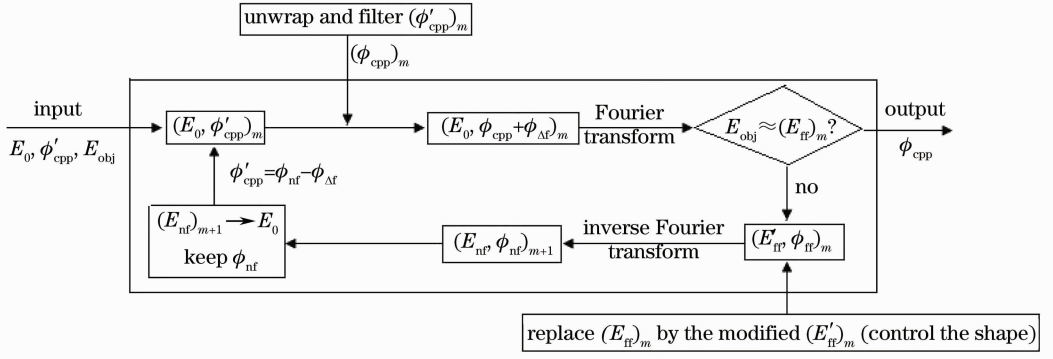


图3 改进GS算法的流程图

Fig. 3 Flow diagram of improved GS algorithm

首先对 z_2 面上目标函数进行修正补偿处理,如果要求在倾斜的圆柱面上的目标是圆形焦斑,那么在 z_2 面上的焦斑就应该是椭圆的。另外一般焦斑光强随着离焦距离的增大而减小,所以将倾斜圆柱

面上标准的超高斯目标函数反推出离焦 z_2 平面上的目标函数,这样离焦面上的迭代目标函数将出现光强分布一定的倾斜,如图4所示。

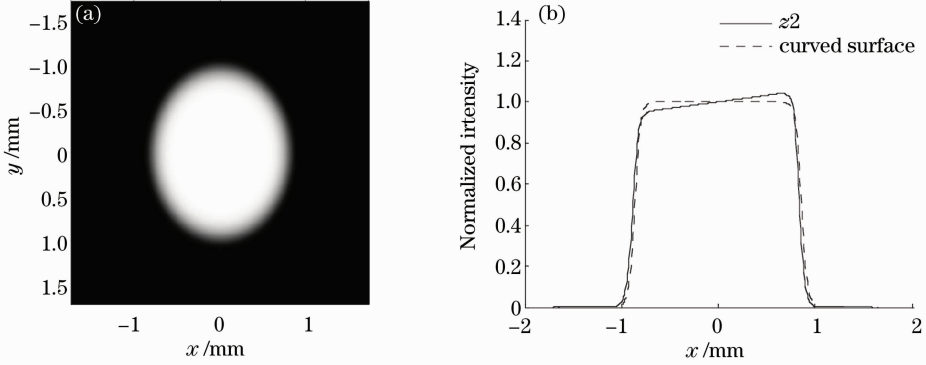


图4 对离焦面上目标函数的修正。(a)二维;(b)一维

Fig. 4 Modified objective function. (a) 2D; (b) 1D

通过这一修正补偿措施,以离焦 z_2 面为设计目标时,目标光斑是椭圆形的,同时考虑曲面离焦距离的不同,在目标函数的光强分布上进行适当地增大或减小补偿,这样可以使以 z_2 面为设计目标得到的CPP在倾斜圆柱面上的整形效果达到要求,具体设计时,可根据设计效果不断调整修正的目标函数。

下面讨论离焦影响,根据傅里叶光学的知识,菲涅耳衍射积分公式的傅里叶变换形式^[8]:

$$E(x_{\text{ff}}, y_{\text{ff}}) = \mathcal{F}\{E'_0(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}}) \exp[i\phi_z(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}})]\}, \quad (1)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换, $E'_0(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}})$ 为近场入射光,

$\phi_z = \frac{k}{2z}(x_{\text{nf}}^2 + y_{\text{nf}}^2)$ 表示传播距离的二次相位调制。

另外聚焦透镜的相位调制有 $\phi_f = -\frac{k}{2f}(x_{\text{nf}}^2 + y_{\text{nf}}^2)$,

那么,

$$E'_0(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}}) = E_0(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}}) \exp[i\phi_f(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}})], \quad (2)$$

从而得到

$$E(x_{\text{ff}}, y_{\text{ff}}) = \mathcal{F}\{E_0(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}}) \exp[i\phi_f(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}})] \times \exp[i\phi_z(x_{\text{nf}}, y_{\text{nf}})]\}, \quad (3)$$

由此可知离焦对光束的影响就是叠加一个离焦产生的相位因子,

$$\phi_{\Delta f} = \phi_z + \phi_f = \frac{k}{2z}(x_{\text{nf}}^2 + y_{\text{nf}}^2) - \frac{k}{2f}(x_{\text{nf}}^2 + y_{\text{nf}}^2), \quad (4)$$

显然在焦面上有 $z=f$, 则 $\phi_{\Delta f}=0$, 没有附加相位,这是通常考虑的情况,在离焦时附加相位的对远场的调制影响不可忽略。

按照前面的讨论,完成了对离焦曲面均匀辐照的连续相位板优化设计,还必须准确计算经过CPP整形后的激光束在倾斜圆柱面上的光强分布,以便于分析焦斑的性能。本文采用快速傅里叶变换计算ICF靶腔曲面光场分布,借鉴医学上广泛采用的计算机断层扫描成像思想,提出分层计算方法,计算出

众多截面的光场,得到规则化的三维网格数据,最后按照“最相邻”的原则,近似拟合出 ICF 靶腔表面上的激光辐射场。设 (x, y, z_0) 为表面上的任意一点坐标,与它最相邻的两个分层坐标为 (x, y, z_M) , (x, y, z_{M-1}) ,如果满足

$$|z_M - z_0| \leq |z_0 - z_{M-1}|, \quad (5)$$

则 (x, y, z_M) 与 (x, y, z_0) “最相邻”,则取 (x, y, z_M) 处的光强近似代表 (x, y, z_0) 处的光强,反之取 (x, y, z_{M-1}) 处的光强。当分层数 M 很大时,可以得到很好的拟合效果。可以看出,每一次快速傅里叶变换(FFT)计算只能计算靶腔曲面上一条曲线上的光强分布,为了得到满足采样定理的计算结果,分层数 M 也必须足够大。

3 模拟计算与分析

为了验证理论分析的正确性和可行性,以美国的国家点火设施(NIF)为例设计了一个针对离焦曲面的 CPP,模拟参数如下:相位元件尺寸为 $400 \text{ mm} \times$

400 mm ,最小加工尺寸为 10 mm ,输入光束光强为10阶矩形超高斯函数,通光口径为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$,激光波长为 ICF 打靶用的三倍频光波长 $\lambda = 0.351 \times 10^{-3} \text{ mm}$,采样点数为 512×512 ,聚焦透镜的焦距为 $f = 7700 \text{ mm}$,离焦倾斜圆柱面上理想光束光强为6阶圆形超高斯函数,焦斑半径为 2.37 mm 。

靶腔的侧面开口直径 $2r = 3.5 \text{ mm}$,聚焦透镜焦点在开口的中心,圆柱靶腔的直径为 $2R = 15 \text{ mm}$,光线倾斜 $\theta = 55^\circ$ 。

由于是以平面作为设计目标,在倾斜的圆柱面上要求是圆形焦斑,那么在设计平面上相应的设计目标应该是椭圆焦斑,长短轴比为 $1 : \sin 55^\circ = 1 : 0.8192$,得到焦面和离焦 z_2 上的目标场为 $2.37 \text{ mm} \times 1.94 \text{ mm}$ 椭圆焦斑。

为了评价新思路设计 CPP 的整形性能,与传统的以焦面为目标的设计方法进行比较和分析。按照前面的迭代流程图设计 CPP 的相位分布图如图 5 所示。

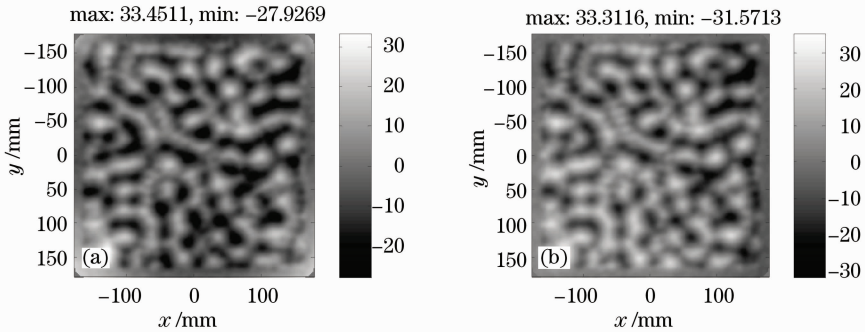


图 5 两种设计方法得到的 CPP 相位分布。(a)新方法;(b)传统方法

Fig. 5 Phase distribution of CPP obtained by two different methods. (a) New method; (b) traditional method

其中图 5(a)是以离焦的 z_2 面为目标接收面设计的,图 5(b)是以焦面为目标面设计的。由于入射光的通光口径有限,在 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ 的范围内有光强,所以范围以外的相位调制对远场不起作用,为了便于比较,这里只给出了这个范围内的相位分布。可以看出,以离焦面作为设计目标的 CPP,虽然包含了离焦产生的附加相位的影响,但是在通光口径内的相位分布和以焦面为目标的相位分布总体差异不大。计算时发现由于离焦的影响,以离焦的 z_2 面为目标接收面设计的 CPP,在相位板周围的相位分布有突起的趋势,这是 CPP 为了补偿离焦产生的附加相位 $\phi_{\Delta f}$ 的结果,根据 $\phi_{\Delta f}$ 的表达式,离中心越远, $\phi_{\Delta f}$ 的值越大,导致需要 CPP 补偿的相位越多,所以相位分布周围有突起。

分别应用图 5(a)(b)设计的两个 CPP 对激光束

进行整形,采用分层计算的方法,给出了在倾斜圆柱面上的光斑分布情况,计算时共分 512 层。

图 6(a),(c)和(e)表示经以离焦 z_2 面为目标得到的 CPP 整形后在倾斜远场的散斑分布、倾斜远场的径向分布和 $100 \mu\text{m}$ 滤波后的光强分布;图 6(b),(d)和(f)表示经以焦面为目标得到的 CPP 整形后在倾斜远场的散斑分布、相应的径向分布和 $100 \mu\text{m}$ 滤波后的光强分布。

由于在设计平面上是椭圆焦斑,所以在倾斜圆柱面上得到的是圆形焦斑。通过对比,可以清楚地看出新方法设计的 CPP 整形性能得到改进,在倾斜圆柱面上得到了较好的匀滑效果:1)焦斑形态:新方法得到的焦斑在曲面上形态保持得很好,传统方法得到的焦斑已经不再是一个较规则的圆形,有着向外发散的趋势;2)径向平均:新 CPP 和目标函数符

合得比较好,传统 CPP 有着一定的拖尾现象;3) 顶部不均匀性均方根(RMS, R_{RMS})^[4]: 为了便于比较,首先对焦斑进行了 $100\ \mu\text{m}$ 处理,如图 6(e)和(f),

新 CPP 得到焦斑的低频轮廓和目标函数相比控制得较好,顶部不均匀均方根值 $R_{RMS} = 0.0358$, CPP 轮廓控制就明显变坏了, R_{RMS} 增大到了 0.1577 。

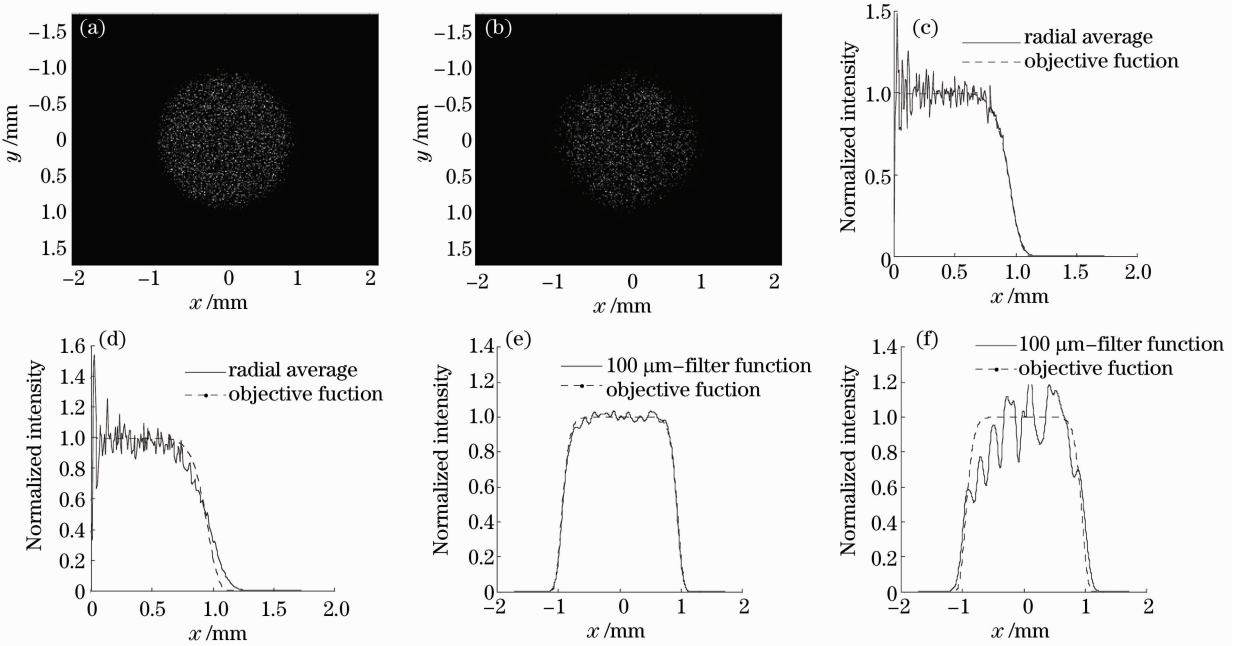


图 6 两种设计方法得到的 CPP 性能的比较。(a)新 CPP-远场散斑;(b)传统 CPP-远场散斑;(c)新 CPP-径向平均;(d)传统 CPP-径向平均;(e)新 CPP- $100\ \mu\text{m}$ 滤波;(f)传统 CPP- $100\ \mu\text{m}$ 滤波

Fig. 6 Performance comparison of CPP obtained by two different methods. (a) Far-field speckle obtained by new CPP; (b) far-field speckle obtained by traditional CPP; (c) radial average from new CPP; (d) radial average from traditional CPP; (e) $100\ \mu\text{m}$ filter from new CPP; (f) $100\ \mu\text{m}$ filter from traditional CPP

通过分析和计算,以焦面为设计目标的 CPP,虽然在焦面上各项指标都满足要求,但是在有实际意义的圆柱面上时,整形效果不佳,无论是焦斑形态、径向平均,还是顶部不均匀性都变差,不能满足实际的需求。以离焦面为设计目标,且考虑曲面影响的新的设计方法,在曲面焦斑的各项指标上均优于传统方法,达到了设计目标,解决了离焦曲面上的束匀滑问题。

平均和顶部不均匀性等关键评价参数上都有显著提高,达到了焦斑均匀化的要求,同时该方法具有快速收敛的优点。

4 结 论

在传统 CPP 设计的基础上,考虑了 ICF 驱动中离焦且光强接收面为倾斜圆柱面的实际需求,提出了新的设计思路,达到了设计要求。首先从初相选取、相位展开、滤波、焦斑频谱控制等多方面改进了传统 GS 迭代算法,然后再以离焦面代替焦面作为设计目标平面,同时在远场对离焦平面上的目标函数进行修正处理,以解决离焦曲面的实际问题。通过理论分析和数值模拟,说明了新的 CPP 设计方法较传统以焦面为设计目标的方法,在焦斑形态、径向

参 考 文 献

- 1 Y. Lin, T. J. Kessler. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21** (20): 1703~1705
- 2 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
- 3 Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Design of continuous phase plates for controlling spatial spectrum of focal spot [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7): 1114~1118
李平,马驰,粟敬钦等. 基于焦斑空间频谱控制的连续相位板设计[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(7): 1114~1118
- 4 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. 基于工艺的连续相位板设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3179~3182
- 5 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237~246

6 J. S. Liu, M. R. Taghizadeh. Iterative algorithm for the design of diffractive phase elements for laser beam shaping [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1463~1465

7 Dennis C. Ghiglia, Louis A. Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast

transforms and iterative methods [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(1): 107~117

8 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. New York: McGraw-Hill Books, 1968

栏目编辑:宋梅梅