

doi: 10.3788/lop47.022301

# 连续相位板优化设计

阳泽健 高福华 姚欣 郭永康

(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)

**摘要** 提出一种适用于连续相位板设计的改进 Gerchberg-Saxton(GS)算法, 该算法应用相位展开相关原理, 结合滤波处理使 GS 算法设计的近场相位连续分布, 同时提出在 GS 算法的远场迭代中采用经过修正的振幅函数, 可使远场光斑的包络更接近目标函数。模拟实验表明, 该方法解决了现有连续相位板设计中相位连续性与靶面光强控制效果难以同时优化的矛盾, 可满足惯性约束聚变(ICF)对束匀滑元件相位连续性、光斑包络及能量集中度的要求。

**关键词** 连续相位板; 优化算法; 波面整形; 惯性约束聚变

中图分类号 TN241 OCIS 230.6120 100.3008 文献标识码 A

## Optimized Design of Continuous Phase Plate

Yang Zejian Gao Fuhua Yao Xin Guo Yongkang

(Key Laboratory for High Energy Density Physics and Technology, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** An improved Gerchberg-Saxton (GS) algorithm for constructing fully continuous phase plate for beam shaping is proposed. The continuity of the phase plate can be ensured by use of phase unwrapping algorithm and Fourier filter operation, and a better far-field intensity profile can be obtained when the objective amplitude is replaced with a proper modified amplitude function during iteration. The simulation test proves that the method has resolved the conflict between the demand of the phase continuity in the phase plate designing and the optimization of the target beam intensity profile. The demand of the distribution continuity for beam smoothing element, good profile of the target beam and high energy centrality in inertial confinement fusion can be satisfied simultaneously by this algorithm.

**Key words** continuous phase plate; iterative algorithm; beam shaping; inertial confinement fusion

### 1 引言

相位板是惯性约束聚变(ICF)驱动系统中实现光束整形和匀滑的重要元件, 其设计目标是使打靶激光在靶面的分布满足平顶陡边且能量集中度高的要求。早期使用的随机相位板可在空域匀滑光束, 但难以对打靶光束进行整形, 能量损失也较高<sup>[1-3]</sup>。后来采用 Gerchberg-Saxton (GS)算法设计相位板, 产生的光束包络能够接近超高斯函数, 且算法收敛快, 能量集中度较高。然而 GS 算法设计的相位板存在相位突变结构, 加工制作困难, 且激光通过含有突变点的相位板会发生大角度散射, 降低打靶激光的能量集中度, 使激光打靶效果变差<sup>[2]</sup>。为了避免打靶激光的大角度散射, 1996年 Y. Lin 等<sup>[4]</sup>提出采用模拟退火算法设计连续相位板, 其设计结果保证了相位分布的连续性, 但能量集中度难以超过 96%, 且靶面光强分布有较严重的拖

收稿日期: 2009-11-19; 收到修改稿日期: 2009-12-04

基金项目: 国家 863 计划(2008AA0920)资助课题。

作者简介: 阳泽健(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率激光传输方面的研究。E-mail: seemoonsee@126.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)

尾问题。另外也有人提出在 GS 算法中使用避免极点的相位展开方法<sup>[5]</sup>, 配合滤波处理, 使近场相位分布连续, 但由于该方法增加了对相位结构的限制, 使得相位板靶面光束整形能力下降, 远场光斑包络变形, 不能满足 ICF 打靶要求。

相位板的设计除了要保证相位连续, 还需要控制打靶光束光斑包络形状及能量集中度, 而 GS 算法和模拟退火算法在光束包络整形方面的能力有限, 使得打靶激光的能量集中度无法进一步提高。目前尚无整形效果较好的算法<sup>[6]</sup>, 因此迫切需要发展新的优化设计方法, 能够更好地对远场光斑的包络进行整形。2002 年 J. S. Liu 等<sup>[7,8]</sup>提出了能有效控制远场光斑包络形状的迭代算法, 该方法以修正后的函数作为 GS 算法中远场的迭代函数, 得到了较理想的靶面光强分布, 但未对设计结果的相位连续性进行分析, 且算法中的重要参数在远场区域为常数, 未能考虑实际光强分布中各种可能出现的情况。2006 年 J. A. Marozas<sup>[9]</sup>提出一种改进 GS 算法, 该方法将相位展开应用到相位板的设计中, 能满足相位分布连续的要求, 所得远场光束的包络较为接近理想情况, 但在中心处有较大的锐脉冲。

针对目前束匀滑相位板设计方法未能很好解决相位板连续分布和远场光斑整形能力的问题, 本文提出一种适用于束匀滑元件设计的改进 GS 算法。该方法根据相位连续操作引起的远场光斑光强形变的情况, 对远场振幅函数进行修正, 获得优化的振幅迭代函数, 进而通过迭代优化使远场光斑光强分布接近理想情况。模拟实验表明, 改进算法具有较好的整形能力, 能满足 ICF 相位板设计对相位连续性、光斑包络及能量集中度的要求。

## 2 原 理

相位展开和滤波操作可以使 GS 算法的近场相位保持连续, 但对相位结构的修改也导致了远场光束包络的形变, 随着循环次数的增加, 形变越来越明显, 这使 GS 算法无法获得较理想的远场光束包络, 程序收敛于较高的极值点。图 1 是含相位连续操作的 GS 算法运行 50 次后的连续相位和远场光强, 图 1(b)中实线表示对应的集中了 97.927% 能量的中心区域的远场光强分布, 与虚线的理想光强分布(振幅为 8 阶的圆形超高斯函数)相比较, 偏离十分明显。根据 J. R. Fienup<sup>[10]</sup>的工作, 采用经过优化的远场目标函数作为 GS 算法中远场迭代函数, 可使 GS 算法跳出局部极值点, 从而获得更接近设计目标的远场光束包络。基于这一思想, 提出适合于连续相位板设计的改进 GS 算法, 该算法在近场通过相位解开及滤波保证相位的连续性, 在远场则采用合理分布的振幅迭代函数来对远场光束包络进行整形, 其流程图如图 2 所示。其中  $E_0$  为迭代算法中输入光场理想的振幅分布,  $E_0$  与  $\phi_0$  远场光场经逆傅里叶变换得到的近场光场的振幅分布与相位分布,  $N_{\text{umber}}$  为循环次数上限,  $C_{\text{const}}$  为评价函数下限。

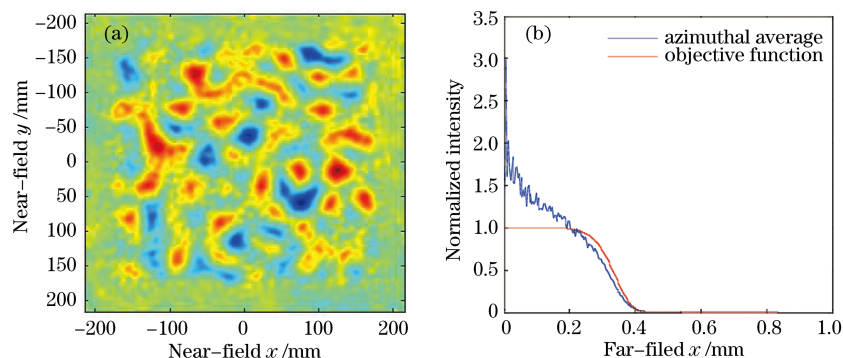


图 1 连续相位分布(a)和远场光强分布(b)  
Fig.1 Distribution of continuous phase (a) and far-field intensity (b)

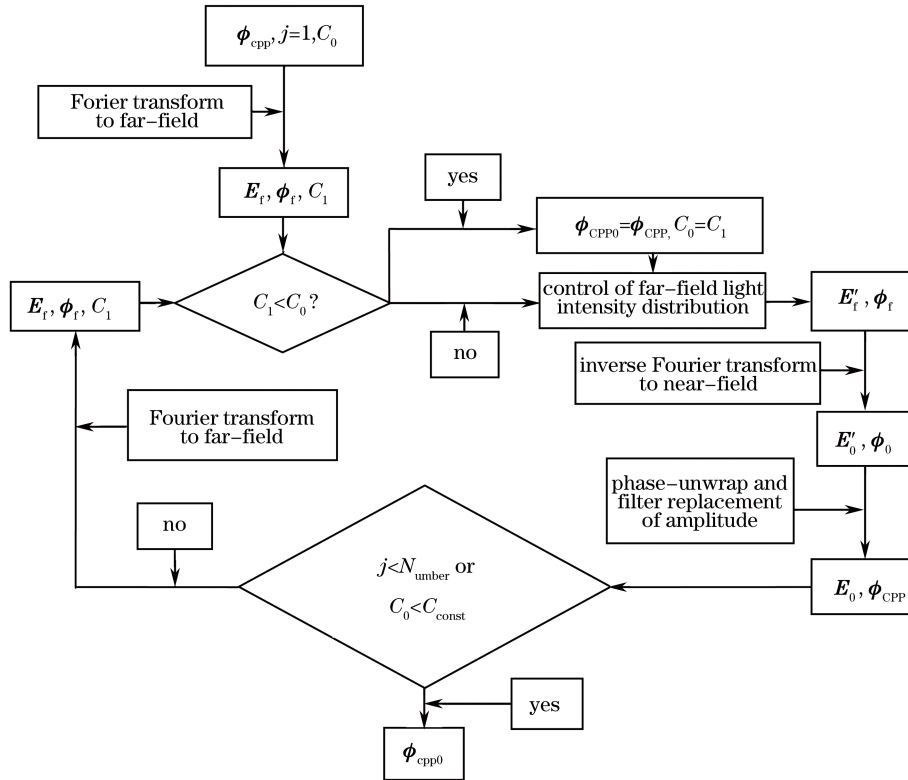


图2 改进 GS 算法的流程图  
Fig.2 Flow chart of improved GS algorithm

初始相位  $\phi_{CPP}$  为图 1(a)中的连续相位，代入改进 GS 算法前先计算初始的远场振幅、远场相位以及代表远场光束质量的评价函数  $C$ 。在第  $j$  次迭代过程中，如果产生的评价函数比前一次的评价函数小，则接受当前的近场相位分布，否则继续进行迭代，直到满足最大迭代次数或者评价函数达到精度要求。在迭代过程中近场相位解开和滤波保证了相位的连续性，远场振幅迭代的优化函数则是根据图 1(b)中远场光强分布的形变构造的，它在远场光强大于理想光强的地方小于理想值，远场光强小于理想光强的地方大于理想值。通过新构造的函数对迭代产生的远场光强分布进行整形，可提高改进算法对靶面光强的控制效果。优化了的迭代函数表达式为

$$\mathbf{E}'_f = N_{orm}(\mathbf{S}_{pec} \times \mathbf{E}_{obj} - \mathbf{E}_{faver}), \tag{1}$$

式中  $\mathbf{E}_{obj}$  为理想的远场振幅分布， $\mathbf{E}_{faver}$  为迭代产生的远场振幅包络的径向平均， $\mathbf{S}_{pec}$  为权重函数， $N_{orm}$  表示能量的归一化，以保证输入输出面能量守恒。式包含了两方面的信息：相位解开导致的远场包络形变的程度，这由形变光束的振幅  $\mathbf{E}_f$  的径向平均  $\mathbf{E}_{faver}$  与理想振幅  $\mathbf{E}_{obj}$  的差值得到；权重函数  $\mathbf{S}_{pec}$  通过不同的权重，使得远场包络更好的接近理想包络。考虑到设计的理想光束为圆形分布的超高斯函数，权重函数应呈径向分布，其数学表达式为

$$\mathbf{S}_{pec} = \mathbf{D} - \mathbf{I} + \mathbf{D}_0 \times \mathbf{p}_{ie_0} + \mathbf{D}_1 \times \mathbf{p}_{ie_1} + \mathbf{D}_2 \times \mathbf{p}_{ie_2} \dots, \tag{2}$$

式中  $\mathbf{S}_{pec}$  的函数表达式分为首项  $\mathbf{D} - \mathbf{I}$  和修正项， $\mathbf{I}$  为归一化的理想光强， $\mathbf{D}$  取大于 1 的常数矩阵，与归一化的  $\mathbf{I}$  作差之后，形成在中心取值小、边缘取值大的连续函数，这种分布对图 1 中远场光束包络的形变(中心取值大，边缘取值小)有一定的校正作用。 $\mathbf{p}_{ie_i}(i=0, 1, \dots, 362)$  为特定位置的环带形函数，环带内取值为 1，带外取值为 0，所有的环带都位于有光强分布的区域以内。以远场光强大于理想光强的大致区域为一个环带，低于理想光强的大致区域为另一环带，一般划分的环带数为 6~9 个便可达到模拟要求，在光强分布达到最优的情况下增减环带数目，则可能会造成远场光束包络新的形变。 $\mathbf{D}_i(i=0, 1, \dots, 362)$  为权重因子，在远场光强大于理想光强的环带内将  $\mathbf{D}_i$  取负值，小于理想光强的环带内将  $\mathbf{D}_i$  取正值，同时远场光

强对理想光强的偏离越大,  $D_i$  的绝对值也越大, 反之则越小。通过权重因子的设定改变优化函数的相对分布, 可有效地对远场光束进行整形, 最终使远场光强分布趋近理想情况。优化过程中按照光强分布的一般规律设置好权重因子(大小通常为  $-2 \sim 10$ ), 根据迭代结果修正环带的数目、宽度以及权重因子的大小, 再反馈回迭代计算中, 直至光强分布满足打靶要求。模拟分析表明, 改进算法在采用优化的振幅迭代函数后, 可在较少的循环次数内获得满足要求的设计结果。

另外为提高所设计相位板的综合效果, 在改进算法中采用了新的评价函数  $C_m$ , 即远场光斑顶部偏离度与能量集中度之比, 光斑顶部偏离度反映了远场光强分布要紧密围绕理想光强分布,  $i_{ta}$  反映了激光惯性聚变中需要较好的利用能量, 故新的评价函数包含了对光束质量两个方面的要求

$$C_m = M / i_{ta} \quad (3)$$

$$M = \left[ \max(I_{0(r < r_0)}) - I_{(r < r_0)} \right]^2 + \left[ \min(I_{0(r < r_0)}) - I_{(r < r_0)} \right]^2, \quad i_{ta} = \frac{\int I_f dr}{E_{total}}$$

式中  $M$  为远场光强在顶部的偏离度,  $r_0$  代表焦斑光强平顶部分的半径,  $r$  为焦斑上各点到圆心的距离, 在积分式中为积分变量,  $I_0$  为远场光强归一化后的结果,  $\max$  和  $\min$  分别代表取最大和最小值的操作。  $i_{ta}$  为能量集中度,  $E_{total}$  为理想光强的总能量,  $R$  为激光打靶范围的半径。采用新的评价函数可在获得较好的远场光强包络的同时, 在打靶范围内具有较高的能量集中度。

### 3 数值模拟

采用改进 GS 算法, 对连续相位板进行了设计, 具体参数为: 相位板尺寸为  $430 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$ , 输入的光束振幅为 16 阶方形超高斯函数, 束腰半径为  $190 \text{ mm}$ , 激光波长为  $351 \text{ nm}$ , 采样点数为  $512 \times 512$ , 聚焦透镜的焦距为  $4000 \text{ mm}$ , 观察屏宽度为  $1.6717 \text{ mm}$ , 远场理想光束的振幅为 8 阶圆形超高斯函数, 束腰半径为  $0.376 \text{ mm}$ , 设计要求在半径为  $0.375 \text{ mm}$  的圆形区域内能量集中度要超过 95%。

采用改进 GS 算法在一台普通计算机上运行, 耗时 11 min, 前部分令相位连续的 GS 算法运行 50 次, 后续改进 GS 算法运行 20 次, 图 3 为设计结果。

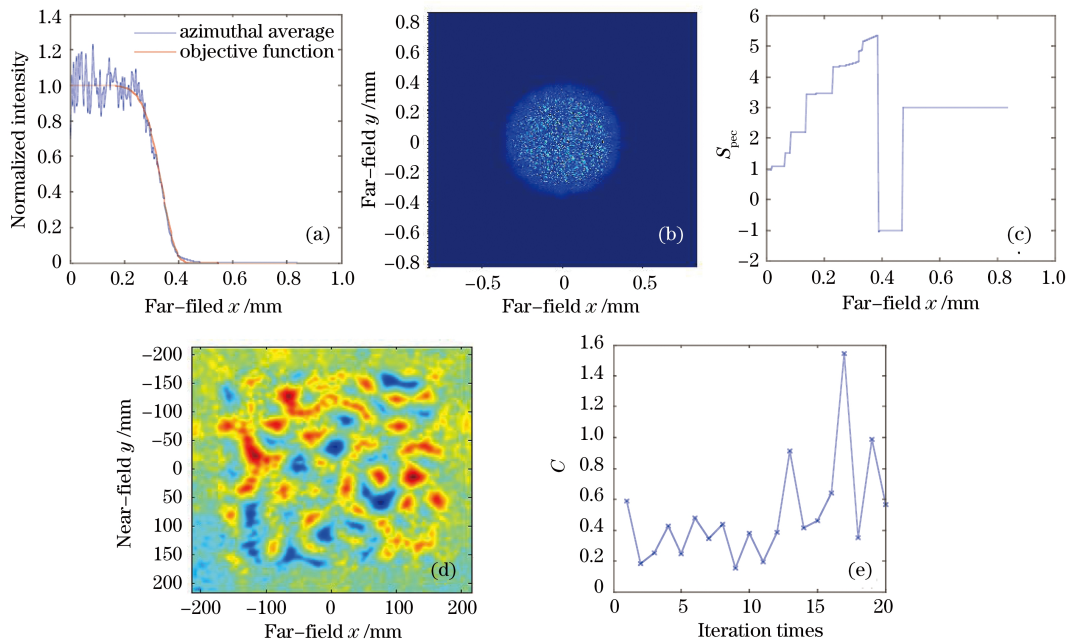


图 3 改进 GS 算法的设计结果  
Fig.3 Design results by improved GS algorithm

图 3(a), (b) 分别是远场光强径向平均分布和散斑分布图, 远场光强的能量大部分集中在中心区域内, 径

向平均后的远场光强分布基本围绕着理想光强, 能量集中度达 97.55%, 这在同类算法中是较难达到的。图 3(c) 为权重函数的径向分布, 环带数为 9, 图 3(d) 为相位俯视图, 可见其分布连续, 起伏范围  $-1.9041 \sim 61.8346$  rad。图 1(a) 和图 3(d) 的相位分布轮廓大致相同, 但细微起伏不同, 说明了相位板分布的低频成分控制了远场光强的分布, 中高频成分进一步影响光束包络的形状和能量集中度。图 3(e) 为评价函数随迭代次数的变化图, 在第 9 次循环时评价函数取值最小, 之后评价函数的变化有增大的趋势。

从设计结果可以知道, 改进 GS 算法在相位连续性和远场光强分布上都较好地满足了 ICF 的打靶要求, 具有一定的优越性。另外, 用远场光斑光强分布均方根误差  $E_{\text{RMS}}$  和能量集中度  $i_{\text{ta}}$  对传统的和改进的 GS 算法的设计结果进行了比较, 结果如表 1 所示。可见改进 GS 算法的能量集中度有显著提高, 但  $E_{\text{RMS}}$  值较大, 这是由于迭代算法对近场相位结构的修改造成的, 实际上从图 3(a) 可见, 远场光强的分布基本围绕着理想光强, 而 GS 算法和模拟退火算法设计得到的结果有明显偏离的部位, 故改进 GS 算法的光强分布应该是最为接近理想光强的。综上, 改进 GS 算法是在能量集中度取较优值时, 保证相位连续分布的情况下, 令靶面光强分布接近理想光强的优化算法。

表 1 算法设计结果比较  
Table 1 Comparison about design results

Algorithms	$E_{\text{RMS}}$	$i_{\text{ta}}$
Simulated annealing algorithm	0.5190	0.9267
Traditional GS algorithm	0.1694	0.9575
Improved GS algorithm	0.4678	0.9755

利用改进 GS 算法的整形能力, 可用它来优化模拟退火算法设计的连续相位, 优化前后状况如图 4 所示, 优化效果较明显, 光强分布的起伏增大, 但相对于模拟退火算法的设计结果更能接近理想光强分布。故改进 GS 算法具有较强的通用性, 可用于其他算法设计结果的优化, 对其他二元光学元件的设计也有一定的借鉴意义, 但是改进算法的初始相位必须是连续相位, 否则近场相位的操作对不连续的相位改变太大, 会导致算法无法收敛。

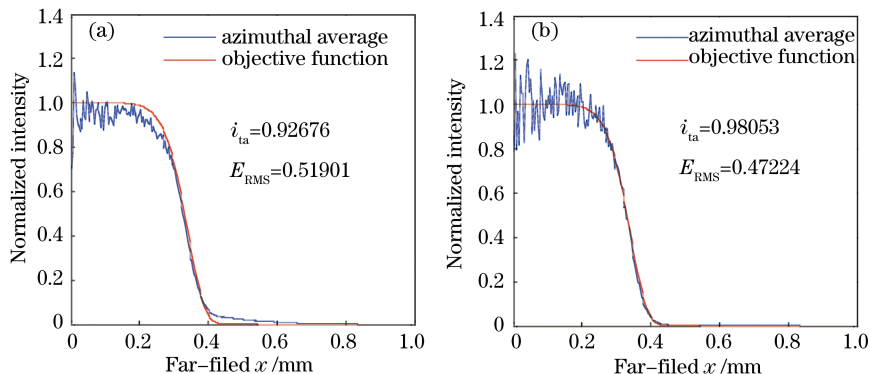


图 4 模拟退火算法优化前(a)和优化后(b)的光强分布  
Fig.4 Azimuthal average intensity distribution before (a) and after (b) optimization

## 4 结 论

ICF 相位板设计的关键是获得连续分布的相位结构, 而现有基于 GS 的迭代算法设计的相位分布不连续, 未能很好解决相位板连续分布和远场光束整形能力的问题。分析了传统 GS 算法在引入了相位连续措施后难以收敛的原因, 提出通过权重函数修正迭代的振幅函数的改进方法, 该方法可有效提高 GS 算法对远场光束整形的能力, 使迭代算法设计的相位板能在相位连续的情况下能同时满足打靶激光能量集中度较高, 光束包络形状较好的要求。模拟结果表明, 改进 GS 算法运行效率高, 设计的相位板相位分布连续,

远场光斑包络接近理想目标, 能量集中度达 97%以上, 在相位连续性、光束包络和能量集中度方面都达到了 ICF 打靶要求。

### 参 考 文 献

- 1 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 764~766
- 2 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
- 3 Xie Jie, Fan Wei, Li Xuechun *et al.*. Spatial laser beam shaping using binary panels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1959~1966  
谢 杰, 范 薇, 李学春 等. 二元振幅型面板用于光束空间整形[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1959~1966
- 4 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. 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
- 5 Li Ping Ma Chi, Su Jingqin *et al.*. Analysis of laser optimized spectrum for smoothing the focused spot by temporal and special method[J]. *Chinese J. lasers*, 2008, **35**(10): 534~538  
李 平, 马 驰, 粟敬钦 等. 时域与空域结合实现光束匀滑的光谱优化分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 534~538
- 6 D. C. Ghiglia, L. 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
- 7 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
- 8 J. S. Liu, A. J. Caley, M. R. Taghizadeh. Symmetrical iterative Fourier-transform algorithm using both phase and amplitude freedoms[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 347~355
- 9 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
- 10 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~2769