

# 实现 ICF 均匀照明的二元光学器件 的混合优化设计\*

郑学哲<sup>1</sup> 王 凌<sup>2</sup> 严瑛白<sup>1</sup> 金国藩<sup>1</sup>

(清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室<sup>1</sup>, 自动化系<sup>2</sup> 北京 100084)

**提要** 结合模拟退火和遗传算法各自的特点,提出了一种混合算法,用以设计阵列型惯性约束核聚变(ICF)均匀照明系统中二元阵列单元的位相分布。混合算法充分利用了遗传算法的并行性及保留一定历史信息特性,并用模拟退火的温度参数控制收敛性。模拟运算表明,混合算法具有较高的效率及寻优可靠性。用本算法设计的均匀照明阵列,可以得到顶部均匀性为 3.2% (rms) 能量利用率接近 90% 的焦斑。

**关键词** 模拟退火,遗传算法,混合算法,ICF 均匀照明,均匀性

## 1 引 言

在激光驱动惯性约束核聚变(ICF)中,要求激光束有极高的均匀性,即所谓的“平顶”光束。而大功率激光器的输出光束往往有波面畸变,其振幅与位相都带有噪声。为提高聚焦系统的抗近场噪声能力,实现均匀照明,一般采用阵列型结构的聚焦系统(如图 1)。入射光束被分成多个子束分别处理,在每个小单元中近似认为入射波面是均匀的,最后由主聚焦透镜将各子束在焦面迭加。典型的技术方案有随机位相板<sup>[1]</sup>、透镜阵列<sup>[2]</sup>等。这些方法都大大提高了焦斑的均匀性,但由于硬边衍射的影响,并不能得到令人满意的强度包络。为消除硬边衍射对焦斑均匀性的影响,阵列单元需具有特殊的非球面位相分布<sup>[3]</sup>,而用传统的光学器件是很难实现这种特殊功能的。

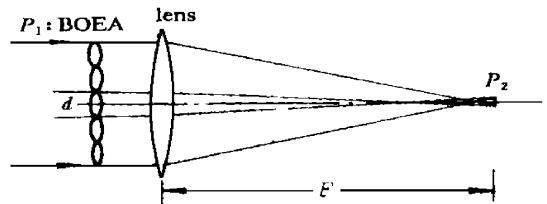


图 1 阵列型 ICF 均匀照明系统原理图  
Fig. 1 The schedule diagram of the ICF uniform illumination array system

近年来,二元光学技术迅速发展,尤其在波面整形方面表现出极大的优越性,它被认为是很有希望实现 ICF 均匀照明的新技术途径。由于均匀照明问题与位相恢复问题的相似性,一般采用迭代优化的方法来设计二元光学器件的位相结构,如较早提出的 KPP(Kinofom Phase Plate)<sup>[4]</sup>, DPP(Distributed Phase Plate)<sup>[5]</sup>,用 GS 及其改进算法<sup>[6,7]</sup>进行设计,可以达到接近 8 阶的超高斯分布;考虑离散计算时采样造成的影响,采用 Y-G(杨 颀)算法<sup>[8]</sup>进行优化

\* 国家高技术惯性约束委员会及国家自然科学基金资助项目。

设计,可以进一步提高焦斑边缘的陡度<sup>[9]</sup>,但其顶部的均匀性还不能满足物理实验的要求。这些优化算法都由目标函数的极值点处导数为零而得到基本迭代公式,优化过程只接受目标函数下降的自变量取值,普遍存在的问题是易陷于局部最优解,因而优化结果依赖于初值。尽管结合几何变换等方法提供的优化初始解,可以改善优化结果,但尚未能找到产生足够均匀焦斑的器件位相分布。

模拟退火算法(Simulated Annealing,简称SA)和遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)是两种近似求解的启发式算法,大大提高了求解问题的全局最优解的可能性。它们已被成功地用于衍射位相光学元件的设计<sup>[10,11]</sup>。为尽可能地得到近“平顶”的焦斑强度包络,本文结合SA和GA的特点,提出以SA&GA混合算法设计ICF均匀照明系统中二元阵列单元的位相分布,分析了如何控制优化过程并给出了混合算法实施的基本规则,取得了较好的效果。

## 2 设计模型

为简化分析,取图1中中心阵列单元,考虑圆对称情况,由菲涅耳积分公式<sup>[12]</sup>可得焦面的输出光场为

$$U_2(r) = \frac{ik_0}{f} \exp\left[-ik_0\left|f + \frac{r^2}{2f}\right|\right] \left| \int_0^R J_0\left(\frac{k_0 dr}{f}\right) \exp[ih(d)] d d \right| \quad (1)$$

其中 $f$ 为透镜焦距, $k_0$ 为 $2\pi/\lambda$ , $R$ 为阵列单元半径, $J_0$ 为零阶Bessel函数, $h$ 为阵列单元位相。

由于数值计算必须进行离散采样处理,因而最后设计得到由不同常数位相环带组成的器件。上述积分可以改写为各个环带积分的和:

$$U_2(r) = \frac{ik_0}{f} \exp\left[-ik_0\left|f + \frac{r^2}{2f}\right|\right] \left| \sum_{n=1}^N e^{ih_n} \int_{d_{n-1}}^{d_n} J_0\left(\frac{k_0 dr}{f}\right) d d \right| \quad (2)$$

其中 $N$ 为器件环带数, $h_n$ 为第 $n$ 个环带的位相, $d_{n-1}$ 为第 $n$ 个环带的最小半径, $d_n$ 为第 $n$ 个环带的最大半径。

对ICF均匀照明问题,只要求输出光强呈“平顶”分布,而对焦面位相分布无特殊要求,所以设计目标为求使下式中 $F$ 最小的器件位相分布 $h_n$

$$F = \left| |U_2|^2 - |U_I|^2 \right|^2 \quad (3)$$

其中 $F$ 为实际输出焦斑复振幅分布 $U_2$ 和理想焦斑分布 $U_I$ 间的距离。也就是说,希望通过优化设计过程,寻求特殊的位相结构,重新分配焦斑的强度分布,来抑制由阵列单元硬边衍射引起的焦斑强度调制。

## 3 SA&GA混合算法

SA算法借鉴不可逆动力学的思想,是基于Mente Carlo迭代求解法的一种启发式随机优化方法。算法在某一温度下,经不断降温,在全局解空间中随机搜索最优解,同时具有概率突跳特点,即在局部极小以一定概率跳出并最终趋于全局最优。SA算法通用性强,不依赖问题的特殊信息,求解全局最优的可靠性高,对初始解选择的鲁棒(Robust)性好,同时算法简单而易于实现。

GA算法借鉴生物进化论的思想,是一种启发式群体概率性迭代优化方法。GA将问题的求解表示成“染色体”的适者生存过程,其中包括选择、交叉和变异操作,通过“染色体”群的一代代不断进化,最终收敛到“最适应环境”的个体,从而求得问题的最优解。GA算法具有并行

搜索能力,同样不依赖问题的特殊信息,但存在进化缓慢和“早熟”现象。

结合 SA, GA各自的优点,利用 GA的并行搜索及保留一定历史信息的能力,为 SA提供初始解;同时利用 SA的温度参数控制 GA的收敛性,可以构造出一种具有更强搜索能力的混合算法。混合算法过程如下:

- (1) 选择初始解群,给定初温;
- (2) 确定每一个体的适配值;
- (3) 重复以下步骤直至算法收敛准则满足:
  - (3.1) 按适配值进行比例复制操作 (proportional Reproduction);
  - (3.2) 进行交叉操作 (Crossover)并采用择优原则;
  - (3.3) 进行变异操作 (Mutation)并采用择优原则;
  - (3.4) 对种群中每一个体进行模拟退火操作 (Simulated annealing)直至抽样稳定。
    - (3.4.1) 由状态产生函数产生新个体 (Generation);
    - (3.4.2) 利用状态接受函数以一定概率接受新状态 (Acception)
  - (3.5) 退温操作
- (4) 输出最优结果

由算法结构可见,混合算法中模拟退火步骤的初始解来自遗传的结果,而模拟退火步骤得到的解又作为遗传的初始解,遗传算法具有并行处理能力,同时能保留一定历史信息,模拟退火算法具有概率突跳性,当温度较小时就成为趋化性寻优,如此将两种算法混合,一定程度上会提高算法的效率和寻优的可靠性。

## 4 模拟运算及设计结果

根据上述设计模型,利用所提出的混合算法设计二元阵列单元的位相分布。设计参数为:单元口径  $d = 30 \text{ mm}$ ;聚焦透镜焦距  $f = 800 \text{ mm}$ ;波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ;焦斑半径  $r_0 = 200 \mu\text{m}$ 。由式(2)知,迭代过程中被改变的量只有  $h$ ,因而可以得到一个由不变量形成的系数矩阵,它与更新后位相的乘积就是新的输出光场分布。这可以大大缩短求适配值的时间,从而提高算法的效率。

考虑设计条件及计算效率,初始解群只选取了两个个体,一个是几何变换的结果,另一个取常数位相分布。优化所得器件连续位相分布如图 2;焦斑强度分布如图 3曲线 2所示。焦斑光强分布接近 16阶超高斯分布:  $I_0 \exp\left[-2\left|\frac{x}{w}\right|^{16}\right]$ ,顶部均匀性为  $\text{rms} = 3.2\%$ ;能量利用率大于 90%。rms定义为

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{I_i - \bar{I}}{\bar{I}} \right|^2}{n-1}} \quad \bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad (4)$$

其中  $I_i$  表示焦斑顶部各点光强

同样条件下,用 Y-G算法的优化结果如图 3曲线 3所示。虽然焦斑边缘更陡,但顶部均匀

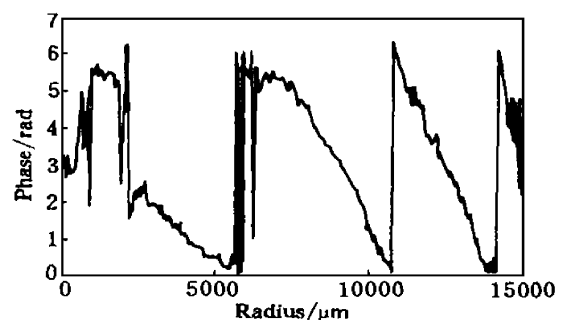


图 2 混合算法所得阵列单元位相分布  
Fig. 2 Phase distribution of the array cell obtained by the hybrid algorithm

性显然不如混合算法结果

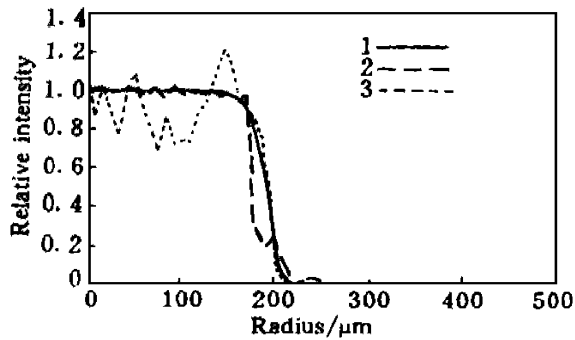


图 3 优化设计所得焦斑光场分布

曲线 1 表示理想 16 阶超高斯分布; 2 表示混合算法优化所得焦斑光强分布; 3 表示 Y-G 算法优化所得焦斑光强分布

Fig. 3 Results of the optimization

Curve 1 is the ideal 16th order super-Gaussian function; curve 2 is the focus intensity distribution obtained by the hybrid

algorithm while; curve 3 is the result of Y-G algorithm

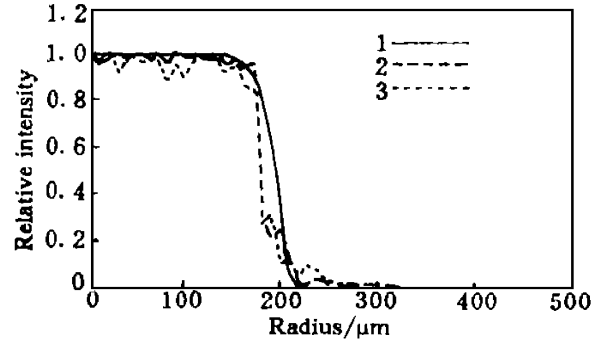


图 4 混合算法与 SA 结果的比较

曲线 1 表示理想 16 阶超高斯分布; 2 表示混合算法优化所得焦斑光强分布; 3 表示 Y-G 算法优化所得焦斑光强分布

Fig. 4 The comparison of the hybrid algorithm and SA

Curve 1 is the ideal 16th order super-Gaussian function; curve 2 is the focus intensity distribution obtained by SA& GA algorithm

while; curve 3 is the result of SA algorithm

同时还进行了混合算法与模拟退火算法的性能比较。由于不是在线问题,算法的时间特性并不是关键问题,所以与只给出优化结果所得焦斑光强分布的比较示于图 4,混合算法所得的焦斑比 SA 结果有更高的顶部均匀性,更小的旁瓣。与 GA 的有机结合确实提高了 SA 的寻优性能。可见,混合算法是很有效的。

## 5 小 结

本文利用 SA& GA 混合算法优化设计了 ICF 均匀照明二元光学器件,得到了较有希望的结果。

分析混合算法的特点可知,当 GA 的并行化全空间搜索能力和 SA 的概率突跳特点结合后,混合算法具有更好的收敛性能,并在较大程度上避免陷入局部极小解。种群中各个体完全相同时,复制和交叉操作不能改变个体,而只能通过变异和模拟退火操作使得种群发生转移,当变异概率较小且不引入模拟退火操作,算法将长时间在旧状态“徘徊”,搜索效率很低且易出现“早熟收敛”现象。SA 算法的引入使这种僵局打破的概率大大加大,从而提高搜索效率;同时,SA 算法在局部极小解具有概率突跳性,从而避免“早熟”现象而加大趋于全局最优的概率。当温度降到较低时,SA 算法就成为概率为 1 的保优变异操作(即趋化性算法),从而提高变异的效率和性能。另一方面,为提高全局收敛的效率,自然希望适配值高的状态得以较大概率生存,复制操作在这方面起较大作用,但过强的复制操作会将状态过分地吸引到局部极小解而出现“早熟”现象,因此 SA 算法的引入很有必要。混合策略归纳为遗传算法利用模拟退火算法得到的解作为初始种群,通过并行化遗传操作使种群得以进化,模拟退火算法对遗传算法得到的进化种群进行进一步优化(温度较高使具有较强的概率突跳性以免陷入局部极小解,相对于对种群的“粗搜索”;温度较低时演化为趋化性算法,相对于对种群的“细搜索”)。这种不仅是算法上的混合,而且是进化思想上的混合策略,对解决优化问题提供了很好的途径。

对用二元光学方法实现 ICF 均匀照明问题,如果增加初始解群中的个体数,使其含有更多的优良基因,会大大提高得到全局最优解的可能性,从而得到近“平顶”分布的焦斑。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga *et al.*. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(11): 1057
- 2 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~ 381
- 3 N. Nishi, T. Jitsuno, K. Tsubakimoto *et al.*. Aspherical multi lens array for uniform target irradiation. *SPIE*, 1993, **1870**: 105~ 111
- 4 S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6): 417~ 419
- 5 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 764~ 766
- 6 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 1972, **35**: 237~ 246
- 7 J. R. Fienup. Reconstruction and synthesis applications of an iterative algorithm. in *Transformations in Optical Signal Processing*, W. T. Rhodes, ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1981, **373**: 147~ 160
- 8 G. Z. Yang, B. Y. Gu, B. Z. Dong. Theory of the amplitude-phase retrieval in any linear transform system and its applications. *Int. J. Mod. Phys.*, 1993, **B7**: 3152~ 3224
- 9 X. Z. Zheng, Y. B. Yan, G. F. Jin *et al.*. Diffractive optical elements for inertial confinement fusion (ICF). *SPIE*, 1996, **2866**: 99~ 103
- 10 Yang Guoguang. Genetic algorithm to the optimal design of diffractive optical elements and its comparison with simulated annealing algorithm. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1993, **13**(7): 577~ 584 (in Chinese)
- 11 M. P. Dames, R. J. Dowling, P. Mcchee *et al.*. Efficient optical elements to generate intensity weighted spot arrays design and fabrication. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(19): 2685~ 2691
- 12 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. New York: McGraw-Hill, 1968, Chap. 4, 57~ 61

## Design Binary Optics Elements for ICF Uniform Illumination with Hybrid Optimization Method

Zheng Xuezhe<sup>1</sup> Wang Ling<sup>2</sup> Yan Yingbai<sup>1</sup> Jin Guofan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Precision Instruments, <sup>2</sup>Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** In this paper, a novel hybrid algorithm which combines SA (simulated annealing) algorithm with GA (genetic algorithm) is used to design binary optics elements for ICF (inertial confinement fusion) uniform illumination. GA, which is a parallel algorithm, reserves historical information for SA, while SA's parameter, temperature, is used to control GA's convergence. Simulation calculation shows that the hybrid algorithm is effective and robust. A focal spot with a uniformity 3.2% (rms) and an efficiency approximating to 90% is obtained by this method.

**Key words** simulated annealing algorithm (SA), genetic algorithm (GA), hybrid algorithm, ICF uniform illumination, uniformity