

基于模拟退火算法的透镜列阵优化设计

张琥杰¹ 周申蕾¹ 邬融¹ 李菁辉¹ 冯伟² 林尊琪¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)
²上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 透镜列阵常被用于改善高功率激光装置均匀照明系统焦斑空间强度分布的均匀性。将模拟退火算法引入透镜列阵的优化设计中,通过改变列阵元的尺寸及其正负透镜属性,在保证焦斑能量利用率的同时把焦斑的不均匀度从经典设计下的 0.2268 降低到 0.1202,大大改善了远场焦斑的空间均匀性,并通过对比传统设计和优化设计下焦斑的功率谱密度曲线,分析了不同的设计结构对焦斑形态的影响。

关键词 光学设计;透镜列阵;模拟退火算法;不均匀度;能量利用率;功率谱密度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1216001

Optimization Design of Lens Array Based on Simulated Annealing Algorithm

Zhang Hujie¹ Zhou Shenlei¹ Wu Rong¹ Li Jinghui¹ Feng Wei² Lin Zunqi¹

(¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
²Shanghai Institute of Laser and Plasma, Shanghai 201800, China)

Abstract Lens array is always used to improve the uniformity of far field spatial intensity distribution on a high power laser system. This article introduces the simulated annealing algorithm into an optimal design of lens array, which changes the size and lens attributes of array elements, and finally reduces the ununiformity of the focal speckle from 0.2268 which is measured with a classical design to 0.1202 under the condition that the energy efficiency is satisfied, this shows that the optimal design greatly improves the uniformity. The curves of power spectral density of two speckle are also contrasted to research the impact of different design structures on it.

Key words optical design; lens array; simulated annealing algorithm; uniformity; energy efficiency; power spectral density

OCIS codes 220.3620; 050.1965; 030.6140; 080.2740

1 引言

在惯性约束核聚变(ICF)^[1]实验与高压状态方程及等离子体不稳定性等实验中,需要将高功率激光束非常均匀地入射到特定的靶面^[2,3]。为到达这个目的,可以在高功率激光装置中采用透镜列阵^[4,5]均匀照明系统。在经典的透镜列阵设计中,由于列阵元的硬边衍射,焦平面处的合成焦斑不是“平顶”的,需要精确移动靶面相对焦平面的距离来实现“平顶”,而离焦会带来光强包络的“塌边”,降低焦斑的能量利用

率。为此,本文引入模拟退火算法^[6,7],优化透镜列阵的设计使焦斑的均匀性得到提高。

2 理论分析

透镜列阵的核心是将准近场照明和用列阵分割波面使得在入射光束近场强度不均匀的条件下仍能获得均匀的靶面焦斑。

透镜列阵把入射光束分割成多个小光束,各子光束在大、小透镜的组合焦点上聚焦后再发散,并对

收稿日期: 2011-07-13; 收到修改稿日期: 2011-08-09

作者简介: 张琥杰(1986—),男,博士研究生,主要从事束匀滑方面的研究。E-mail: zhanghujie@ustc.edu.cn

导师简介: 林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,主要从事高功率激光技术和激光等离子体等方面的研究。

E-mail: zqlin@mail.shcnc.ac.cn

靶面的同一区域全部照明,即各子光束都同样叠加在靶面上。只要阵列元的数目足够多,就可以大大减少由于入射光束近场分布不均匀对靶面照射带来的影响。另外,由于靶面的位置并不是组合焦斑的位置,也就是实际照明区域是个准近场区,由此焦斑将获得非常好的陡边特性。

由于列阵元的硬边衍射,焦平面处的合成焦斑不是“平顶”的,存在两个肩状突起,需要精确移动靶面相对焦平面的距离来实现“平顶”。需要提出的是,靶面光强分布对离焦量非常敏感,在实际操作中必须很仔细地调整靶面的位置。同时,离焦的操作会带来塌边现象,即焦斑能量利用率的下降,为此,必须在焦斑的不均匀度和能量利用率之间寻找一个平衡点。

考虑到离焦的目的在于避免各子焦斑完全重叠带来的大尺度强度起伏,为了进一步改善焦斑质量,考虑结合其他手段来实现这个目的,改变原有各列阵元完全一致的结构,使得每个列阵元产生的子焦斑在焦面处不能完全相同。

为了寻找优化的列阵元大小,采用了模拟退火算法,其基本思路是利用随机搜索的方法,在整个自变量空间寻找满足约束条件的最优解。其基本过程是:首先确定一个评价函数,该函数用于衡量系统的优劣,然后确定影响评价函数特性的变量及其有效变化范围,并在这个自变量空间内随机或者按一定规则取一起点,之后按一个随机变化的步长搜索评价函数的变化,如果评价函数得到优化则保留此点并作为下次搜索的起点,如果变差则按一定概率决定此点的取舍,这种做法可以让系统有效地跳出局部最优解,得到全局最优解。

在以上优化的基础上,考虑改变透镜的正负属性能进一步提高焦斑的质量。在经典的透镜列阵设计中,小列阵元全部由正透镜组成,正透镜在靶面上的子焦斑是形成在会聚之后,此时如果采用负透镜,则靶面上的子焦斑将形成在会聚之前,两者虽然在聚焦透镜焦面处的强度分布一致,但是对离焦的反应有较大的差异,即在离焦的情况下两者的子焦斑不会因为完全重叠引入大尺度强度起伏。因此,在透镜列阵的优化设计中将某几个小单元以负透镜代替可以进一步改善焦斑的不均匀度。

3 透镜列阵的优化设计

出于减少计算量的考虑,设计了一维的透镜列阵。

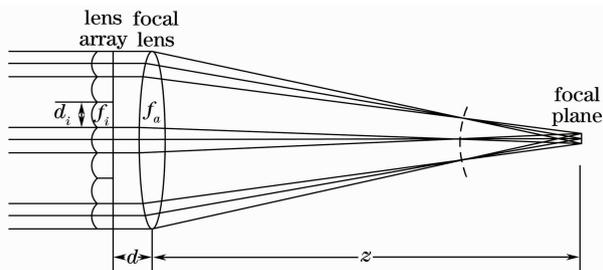


图 1 经典透镜列阵示意图

Fig. 1 Schematic of classical lens array

经典的透镜列阵系统如图 1 所示,在该系统中,设透镜列阵到聚焦透镜的距离为 d ,聚焦透镜焦距为 f_a ,靶面到聚焦透镜的距离为 z ,第 i 个列阵元的焦距和大小分别为 d_i 、 f_i ,则从透镜列阵出射到靶面的传输矩阵^[8]表示为

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - z/f_a & d(1 - z/f_a) + z \\ -1/f_a & 1 - d/f_a \end{bmatrix}. \quad (1)$$

设定入射光束的光场为 $E_0(x)$,透镜列阵的位相函数为 $T(x)$,则由 Collins 公式^[9]可计算出靶面的输出光场分布

$$E_t(x) = \sqrt{-\frac{i}{\lambda B}} \int E_0(x) T(x) \exp[jkL(x; x_0)] dx_0, \quad (2)$$

式中 L 为光学系统的程函,且有

$$L(x; x_0) = (d + z) + \frac{1}{2B} [Ax_0^2 - 2xx_0 + Dx^2]. \quad (3)$$

在透镜列阵的应用中,主要关注的参数是焦斑的不均匀度,故将焦斑的均方根(RMS)定义为评价函数

$$y_{\text{RMS}} = \left[\frac{\langle (I(x) - \bar{I})^2 \rangle}{\bar{I}^2} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

式中 $I(x)$ 为焦斑各点的光强, \bar{I} 为整个焦斑光强的平均值,尖括号“ $\langle \rangle$ ”表示对括号内的物理量取平均。

优化设计中通过改变透镜单元的大小及正负属性来降低 RMS 值,对于透镜列阵系统,考虑到各子焦斑的尺度必须保持一致,小列阵元的焦距需要满足

$$f_i = Fd_i/\delta, \quad (5)$$

式中 F 为聚焦透镜的大小, δ 为所需焦斑的大小。

同时为了让透镜列阵能接受整个光束且数据具有物理意义, d_i 需要满足约束条件

$$\sum_i d_i = D, d_i > 0, \quad (6)$$

式中 D 为入射光束的口径。

透镜单元的正负属性由改变列阵元相位函数的

正负号控制。

4 模拟计算

模拟计算采用的入射光束由 CCD 采样高功率激光系统近场图样所得,其光强分布如图 2 所示。

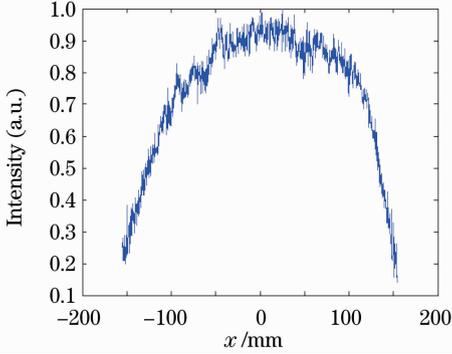


图 2 入射光束光强分布

Fig. 2 Intensity distribution of incident beams

此入射光束口径 310 mm,计算得其初始 RMS 值为 0.4373。目标焦斑的直径为 $500 \mu\text{m}$,聚焦透镜的焦距为 1575 mm。

在经典的透镜列阵设计下,即各单元由相同大小的正透镜组成,以采用 7 个列阵单元为例,匀滑后所得焦斑的 RMS 值为 0.2268,能量利用率为 91.73%,本文的其他优化计算皆在保证能量利用率

表 1 优化设计的透镜列阵参数

Table 1 Parameters of an optimal design of lens array

Sequence number	1	2	3	4	5	6	7
Size /mm	58.071	13.28	41.89	85.49	56.18	26.23	28.85
Focus /m	182.9	41.8	131.9	269.3	177	82.6	90.9
Attribute	Concave	Concave	Convex	Convex	Convex	Concave	Concave

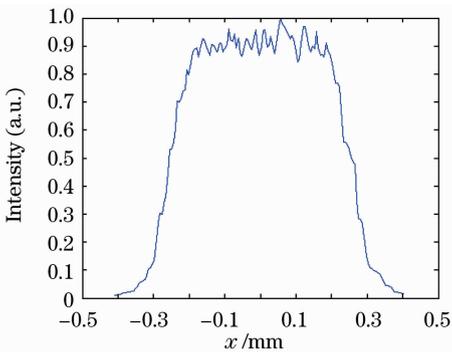


图 4 退火算法设计下焦斑光强分布

Fig. 4 Intensity distribution of focal spot under simulated annealing algorithm

计算所得的 RMS 值为 0.1202,能量利用率为 90.12%。和传统设计下的焦斑对比,此焦斑的 RMS 值在保证能量利用率的基础上得到了较大改善。

大于 90%的情况下进行,下不赘述,焦斑强度分布如图 3 所示。

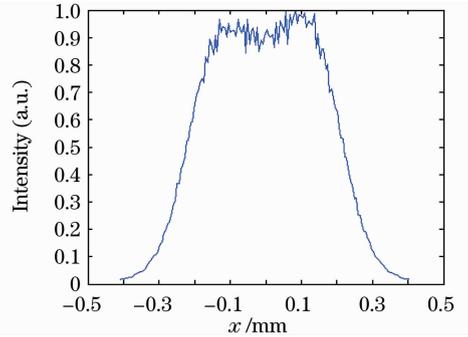


图 3 传统设计下焦斑光强分布

Fig. 3 Intensity distribution of focal spot under traditional design

从图 2 和图 3 的对比看,经过透镜列阵匀滑的焦斑中心区域获得了一个较好的平顶分布,另外,通过离焦的处理,焦斑的肩状突起也得到了大幅度的缓解。

为了进一步改善焦斑质量,继续采用基于模拟退火算法的透镜列阵设计对此入射光束进行匀滑处理,在约束条件下改变透镜单元的属性计算焦斑的不均匀度和能量利用率,筛选出合格的设计结果。

优化所得的透镜列阵参数见表 1,计算后的焦斑强度分布如图 4 所示。

为了进一步研究改进设计下的焦斑特性,计算了两个焦斑的功率谱密度曲线如图 5 所示,值得说明的是之前的 RMS 值计算及强度分布图是在考虑等离子体热匀滑^[10]的基础上进行的,此处的功率谱

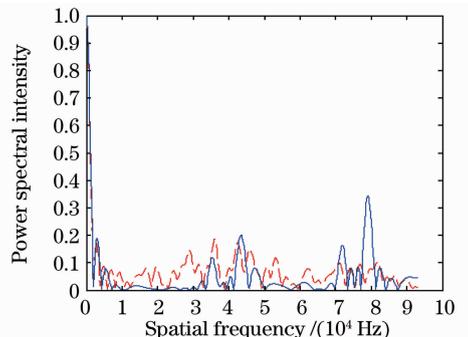


图 5 功率谱密度对比

Fig. 5 Contrast of power spectral intensity

密度曲线出于对高频量保留的考虑没有加入热匀滑。

图 5 中,实线表示经典透镜列阵设计下的功率密度曲线,虚线表示优化设计下的功率谱密度曲线。从图 5 可以看出,在经典透镜列阵设计下,其所得焦斑的功率谱密度曲线在高频部分具有相当高的值。这是因为设计中各小列阵元采用了完全相同的结构,尽管有意识地通过离焦消除其小焦斑重复叠加的影响,仍然存在相当强的强度起伏。而在优化设计下的焦斑功率谱曲线中,其高频成分得到了很好的抑制,但是和经典的设计相比,其在中频区域的谱密度有了提高,这是因为这种设计采用的小单元无论在单元尺度还是正负属性上都是不对称的,最终的焦斑形态也必然具有一定的不对称性,即反映在功率谱密度中低频成分的增强。

5 结 论

将模拟退火算法引入透镜列阵的优化设计,对比了经典设计下的透镜列阵与优化设计后透镜列阵的所得焦斑,优化设计后的透镜列阵在保证焦斑能量利用率的基础上进一步降低了不均匀度,并通过对比两者的功率谱密度曲线研究了不同设计对焦斑形态的影响,发现非对称结构设计对抑制焦斑的高频成分有着显著的效果。

本文的设计针对一维透镜列阵进行,对需要强度分布均匀焦线的 X 射线激光实验^[11]中有一定的技术支持作用,但对于需要焦斑整体质量的实验仍然需要二维的透镜列阵设计,二维设计下拼接、填

充、大尺度不对称结构的加工等都将会是下一步需要解决的问题。

参 考 文 献

- 1 Wang Gch. A brief review of the progress of laser inertial confinement fusion in recent years [J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 1997, **17**(3): 266~269
- 2 S. Skupsky, K. Lee. Uniformity of energy deposition for Laser Driven Fusion[J]. *Appl. Phys.*, 1983, **54**(7): 3662~3671
- 3 Jiang Xiujuan, Lin Zunqi. Research progress of beam smoothing in high power laser driver[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 091407
江秀娟,林尊琪. 高功率激光驱动器光束匀滑技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(9): 091407
- 4 邓锡铭,梁向春,陈泽尊等. 用透镜列阵实现大焦斑面的均匀照射[J]. *中国激光*, 1985, **12**(5): 257~260
- 5 Li Hui, Liu Kan, Zhang Xinyu *et al.*. 128 × 128 Elements frequency driven liquid crystal lens array with tunable focal length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 218~223
李 晖,刘 侃,张新宇等. 128 × 128 元频率驱动变焦液晶透镜阵列[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 218~223
- 6 S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Bectchi. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~680
- 7 Wu Rong, Zhao Dongfeng, Dai Yaping. Optimize design of diffractive optics elements by parallel simulated annealing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2544~2548
邬 融,赵东峰,戴亚平. 并行模拟退火算法优化衍射光学元件设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2544~2548
- 8 Wang Shaomin, Zhao Daomu. Principles of Matrix Optics[M]. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1994 王绍民,赵道木. 矩阵光学原理[M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1994
- 9 S. A. Collins. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(9): 1168~1177
- 10 Stephen E. Bodner, Robert L. McCrory, Bedros B. Afeyan *et al.*. Direct-drive laser fusion: Status and prospects[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, **5**(5): 1901~1918
- 11 王世绩,顾 援,周关林等. “多靶串接”饱和增益软 X 光激光实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 1992, **4**: 165

栏目编辑:韩 峰