

非离轴楔形透镜 2×2 集束聚焦系统的误差分析

雷泽民^{1,2}, 孙晓艳^{1,2}, 卢兴强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重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为提高靶面光强, 高功率激光驱动装置中常采用多路激光组束打靶, 目前主要采用 2×2 集束的方式。集束聚焦系统中使用的透镜可分为离轴透镜和非离轴透镜, 采用非离轴楔形透镜的集束聚焦系统在理想条件下可获得很好的焦斑质量。建立了 2×2 集束聚焦系统的光传输模型, 并仿真研究了实际安装调试过程中各种误差对其焦斑造成的影响。结果表明, 反射镜角度和透镜平移对系统的焦斑质量影响很大, 需要对其进行精密调试; 透镜安装角度和焦距误差对系统的焦斑质量影响较小, 现有条件比较容易满足。本文研究可提高研究人员对多光束相干合成集束方案的认识, 对实际系统的安装调试有一定指导意义。

关键词 激光光学; 集束聚焦系统; 非离轴楔形透镜; 光强分布

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0505001

Error Analysis of 2×2 Beam Array Focus System with Non-Off-Axis Wedged Lenses

Lei Zemin^{1,2}, Sun Xiaoyan^{1,2}, Lu Xingqiang¹

¹Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to increase light intensity on the target plane, laser beam array target shooting is usually used in high power laser driver devices, in which 2×2 beam array is widely used at present. The lenses adopted in beam array focusing system lens include off-axis lens and non-off-axis lens. The excellent quality of focal spot can be obtained under ideal conditions when we use the beam array focus system with non-off-axis wedged lenses. The optical propagation model of 2×2 beam array focus system is built, and the influences of various errors on its focal spots during the process of actual installation and adjusting are simulated and investigated. Results show that the mirror angle and the lens translation have great influence on the focal spots quality of the system, and the two components should be precisely adjusted. The influences of mounting angle and focal length error of the lens on the system focal spots quality are relatively little, and it is easy to be satisfied at the present conditions. The researcher's understanding about multi-beam coherent combination scheme can be improved by this study, and it has a certain guiding significance for the installation and adjustment of practical systems.

Key words laser optics; beam array focus system; non-off-axis wedged lens; light intensity distribution

OCIS codes 140.3290; 260.3160; 260.1960; 220.3620

收稿日期: 2016-10-17; 收到修改稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(60707019)

作者简介: 雷泽民(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光光束质量控制、频率转换等方面的研究。

E-mail: lei2008274022@163.com

导师简介: 卢兴强(1973—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光系统设计方面的研究。

E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

在高功率激光装置中,通常采用多路激光组束来提高靶面光强。已建成的美国国家点火装置(NIF)实现了 192 路激光^[1],法国的兆焦耳装置(LMJ)预计实现 240 路激光^[2],中国在建的神光 III 主机装置实现了 48 路激光^[3]。随着激光束数的不断增加,激光装置的靶场空间变得极为有限,为提高装置的集成度,通常将几束激光组成集束,以方便装置元件的安装与调试^[4]。现有的高功率激光装置一般采用 2×2 集束的方式,4 路激光在聚焦系统中通过各自的光路会聚到靶点上^[5-6]。

为了兼颜色分离,聚焦过程中需要采用楔形透镜(简称透镜)。透镜是高功率激光装置中非常重要的光学元件之一,可以分为离轴透镜和非离轴透镜两种,离轴透镜又有二维离轴和一维离轴之分^[7]。美国 NIF 装置采用的是一维离轴透镜^[5],成对的一维离轴透镜将平行光束会聚到同一点,在 2×2 的集束中,还需要反射镜对入射光束进行一定的调整。二维离轴透镜即透镜中心相对透镜光心在 x 和 y 方向都存在离轴量的透镜,采用二维离轴透镜的好处在于,透镜会将 4 束平行激光自动会聚到同一点,不需要对光束进行额外地调整,但是对大口径离轴透镜的精度要求极高,加工难度大,并且价格昂贵,在实际应用中有一定的困难^[8]。另一种方案是采用非离轴透镜,该方案需要调整入射光的角度,使 4 束光的远场焦斑打在同一点上。文献^[9]给出了以上 3 种聚焦方案的理论研究结果,研究表明采用非离轴透镜聚焦方案可以得到质量更好的焦斑,但此结果基于理想条件,实际条件下元件的安装总会存在一定的误差,这些误差可能会导致系统的结果与理论计算有较大误差,因此需要对这些误差可能对系统造成的影响进行进一步的研究。

本文以非涅耳衍射为光传输理论基础,建立相关的集束系统物理模型^[10-11],模拟研究了反射镜角度、透镜角度、透镜平移和透镜焦距误差对系统聚焦结果的影响,并分析了应对措施,有助于提高对采用非离轴透镜集束方案的认识^[12-13]。

2 集束聚焦系统与平面角

采用非离轴楔形透镜的 2×2 集束聚焦系统的示意图如图 1 所示。 $M_1 \sim M_4$ 为反射镜,作用是把从光路上游方向的光束反射到对应的元件或光路上; $L_1 \sim L_4$ 为非离轴透镜,即呈中心对称、光轴在中心的透镜。从图 1 中可以看出,为使 4 束光会聚到 z 轴上的同一点,需要反射镜将入射到透镜上的光束偏转一定的角度,即反射镜要使光束准确进入光路中,并在此基础上有一定的倾角,使光束以一定的角度入射到透镜上。

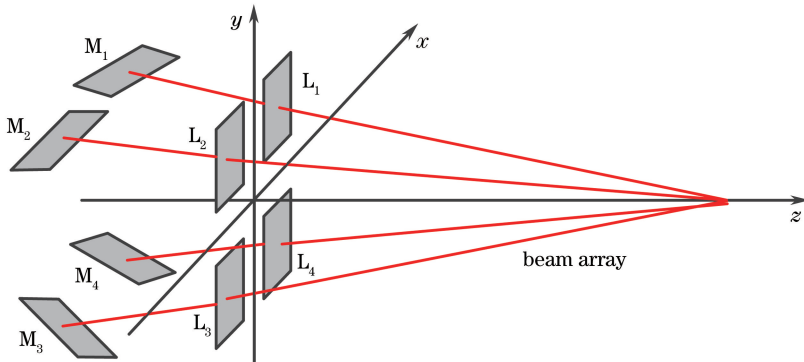


图 1 2×2 集束聚焦系统示意图

Fig. 1 Diagram of 2×2 beam array focus system

在激光装置中,反射镜等器件在安装时有设计好的角度,但实际上由于安装过程中各种因素的影响,与理想位置所在的平面总会有一定的误差。对于这些器件,衡量其与理想平面之间的夹角在误差控制工作中极为重要。

图 2 为平面倾斜角度在三维坐标系中的示意图,以 $x-y$ 平面为理想平面,另一个平面与其呈一定的夹角,由几何知识可知^[14],两个平面的夹角可以用平面与 x 、 y 轴的夹角来定义,分别记为 θ_x 和 θ_y 。夹角正负的定义为:平面逆时针绕 y 轴转动时 θ_x 为正,平面顺时针绕 y 轴转动时 θ_x 为负;平面逆时针绕 x 轴转动时 θ_y 为正,平面顺时针绕 x 轴转动时 θ_y 为负(注意:角度按锐角计)。

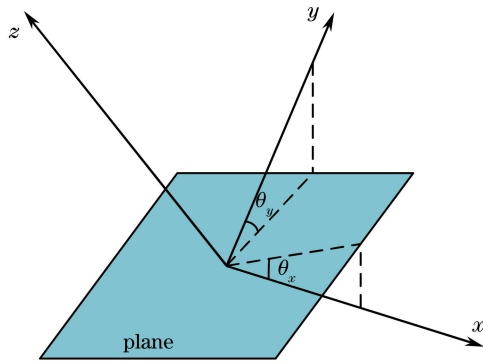


图 2 平面倾斜角度在三维坐标系中的示意图

Fig. 2 Schematic of plane tilt angle in three-dimensional coordinate system

3 集束聚焦系统原理分析

根据衍射理论,若激光束倾斜入射到平面上,则光束的复振幅分布需要增加倾斜因子修正。由第 2 节内容可知,倾斜角度分为 x 和 y 方向上的倾斜,分别设为 α 和 β 。光束的初始相位设为 ϵ ,振幅为 A 的单色平面波倾斜入射到焦距为 f 的薄透镜上,经过透镜后光束的复振幅分布为^[11,15]

$$U_1(x, y) = A \exp\{-ik[\alpha_j(x - C_j) + \beta_j(y - D_j) + \epsilon_j]\} \times \exp\left\{-i\frac{k}{2f}[(x - G_j)^2 + (y - H_j)^2]\right\}, \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, C_j, D_j 为反射镜倾斜平面中心相对于坐标轴中心的偏移量, G_j, H_j 为透镜中心相对于坐标轴中心的偏移量, j 为要合成的激光束个数。焦平面上光束的振幅分布由菲涅耳衍射公式给出,多束激光相干合成后光束的远场复振幅可以表示为

$$U(u, v) = B \iint \sum_{j=1}^m U_1(x, y) \exp\left[i\frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(ux + vy)\right] dx dy, \quad (2)$$

式中 $B = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp\left[i\frac{k}{2f}(u^2 + v^2)\right]$ 为系数因子, $(u, v), (x, y)$ 分别为光束在远场和近场的坐标。

合成后光束的强度分布为

$$I(u, v) = |U(u, v)|^2. \quad (3)$$

4 不同误差对系统聚焦性能的影响

基于图 1 所示的 2×2 集束聚焦系统及相关原理,利用程序数值模拟多组激光相干聚焦的结果。入射光为 4 路激光束,每路光束均是具有一定软边的平顶光束,用 6 阶超高斯分布模拟,如图 3(a)所示。为了匹配大型激光装置的 F 数(这里设置的 F 数为 25),采用 64 位运算程序,采样精度可达到 $1.5 \mu\text{m}$,从而可以获得细节更丰富的焦斑形态分布。相邻子光束的中心间距与子光束口径之比为 1.25。

图 3(b)所示为理想条件下焦斑强度的二维分布。坐标轴转化为方形光束衍射,极限(DL)倍数 $N = DR/(\lambda f)$,其中 R 为坐标值, $D = 2D_0, D_0$ 为子光束口径。在理想条件下,采用非离轴透镜的集束聚焦系统焦斑质量非常好,与采用离轴透镜的集束系统相比在焦斑的分布形态、主瓣宽度、峰值强度、能量集中度等指标上更有优势。

4.1 反射镜角度误差

考虑光路中直接将激光反射到透镜上的反射镜,在 2×2 聚焦系统中共有 4 块反射镜,如图 1 所示。每块反射镜的误差偏转角度都是不可控的,因此会有无数种结果。根据上文平面角度的定义,这 4 块反射镜需要 8 个角度参数来描述,每个参数可以表示为

$$\theta = \theta_s \pm \Delta\theta_{\max}, \quad (4)$$

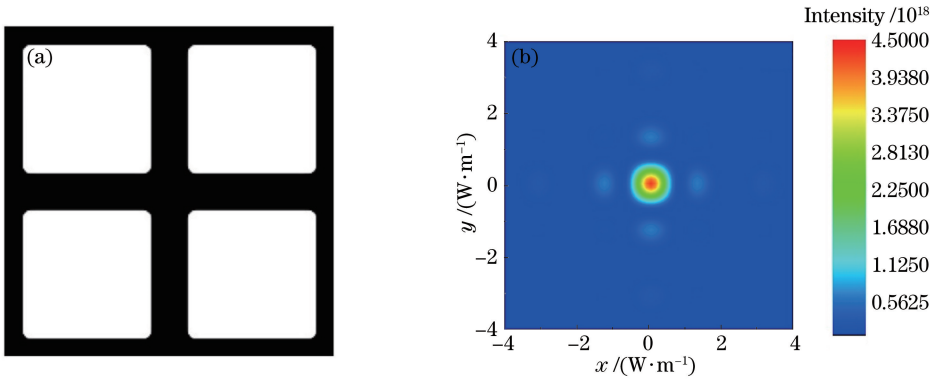


图 3 (a) 2×2 集束聚焦系统的入射光束分布示意图; (b) 理想条件下焦斑强度的二维分布

Fig. 3 (a) Schematic of input beam distribution of 2×2 beam focusing system; (b) two-dimensional distribution of focal spot intensity under ideal condition

式中 θ_s 为反射镜需要设置的角度; $\Delta\theta_{\max}$ 为角度偏转误差的最大值, 即实际安装过程中可以保证的精度。计算 $\Delta\theta_{\max}$ 的改变对聚焦结果的影响, 8 个角度参数在 $[\theta_s - \Delta\theta_{\max}, \theta_s + \Delta\theta_{\max}]$ 范围内随机取值, 以模拟实际测试中误差不可知的情况。

角度偏转最大误差 $\Delta\theta_{\max}$ 使反射镜与理想角度有偏差, 使得光束的远场光斑不能落在理想位置, 导致 4 束光不能完全相干。显然, 当 $\Delta\theta_{\max}$ 达到某一临界值时, 4 束光的远场将在空间上完全错开, 不能相干。考虑两个相同圆形光斑的情况, 当每个光斑移动与半径大小相等的距离时, 就可以完全错开, 如图 4 所示。

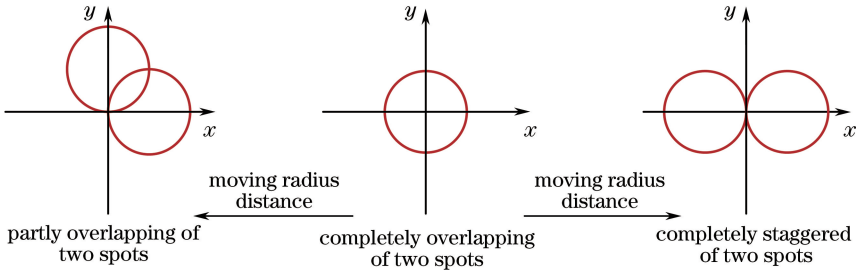


图 4 两相同圆形光斑移动与半径大小相等的距离后位置的变化

Fig. 4 Position change when two same circular spots move distance which equals radius

集束系统的 4 束光同理, 方形光束的艾里斑半径为

$$\rho = \frac{\lambda f}{D_0}, \quad (5)$$

式中 ρ 为光斑在空间位置上偏移量的临界值。将 ρ 转化为反射镜角度的变化, 有

$$\Delta\theta_{\text{th}} = |\theta_{\text{ideal}} - \theta_{\text{far-}\rho}|, \quad (6)$$

式中 θ_{ideal} 为反射镜理想角度; $\theta_{\text{far-}\rho}$ 为远场位置偏离 ρ 的角度; $\Delta\theta_{\text{th}}$ 为反射镜角度误差的临界值, 临界值随结构装置和参数的不同而取不同的值, 此处取 $\Delta\theta_{\text{th}} = 0.013 \text{ mrad}$ 。可见, 在 F 数较小的激光装置中, 反射镜角度误差的临界值非常小。以 $\Delta\theta_{\text{th}}$ 的量级为基准, 计算不同 $\Delta\theta_{\max}$ 时集束系统的焦斑表现。图 5 为 $\Delta\theta_{\max}$ 分别取 $0.005, 0.008, 0.010, 0.016 \text{ mrad}$ 时焦斑强度的二维分布。从图中可以看出, 随着 $\Delta\theta_{\max}$ 的增大, 焦斑形态逐渐变差。当 $\Delta\theta_{\max} = 0.016 \text{ mrad}$ 时, 已经超过了临界值 $\Delta\theta_{\text{th}}$, 焦斑的形态彻底改变, 此时聚焦系统不能保持 4 束光的会聚。当 $\Delta\theta_{\max} \leq \Delta\theta_{\text{th}}$ 时, 焦斑还有比较明显的主瓣、旁瓣之分, 但从标度尺上可以看到, 随着 $\Delta\theta_{\max}$ 的增加, 主瓣的峰值强度明显下降。当 $\Delta\theta_{\max} = 0.008 \text{ mrad}$ 时, 峰值强度已下降为理想焦斑峰值强度的 40% 左右。

由此可知, 对于采用非离轴透镜的集束聚焦系统, 远场的焦斑质量对反射镜的角度误差非常敏感, 在小 F 数的装置中, 角度误差的临界值通常在微弧度量级, 这对反射镜的安装调试和固定提出了极高的要求。在 $\Delta\theta_{\max}$ 的控制方面, $\Delta\theta_{\max}$ 小于临界值时焦斑还能区分主瓣和旁瓣, 系统勉强能保持聚焦能力, 但为了使主瓣保证一定的峰值强度和较好的形态, 需要 $\Delta\theta_{\max}$ 比临界值更小。根据计算结果, 当 $\Delta\theta_{\max}$ 控制在反射镜角度误

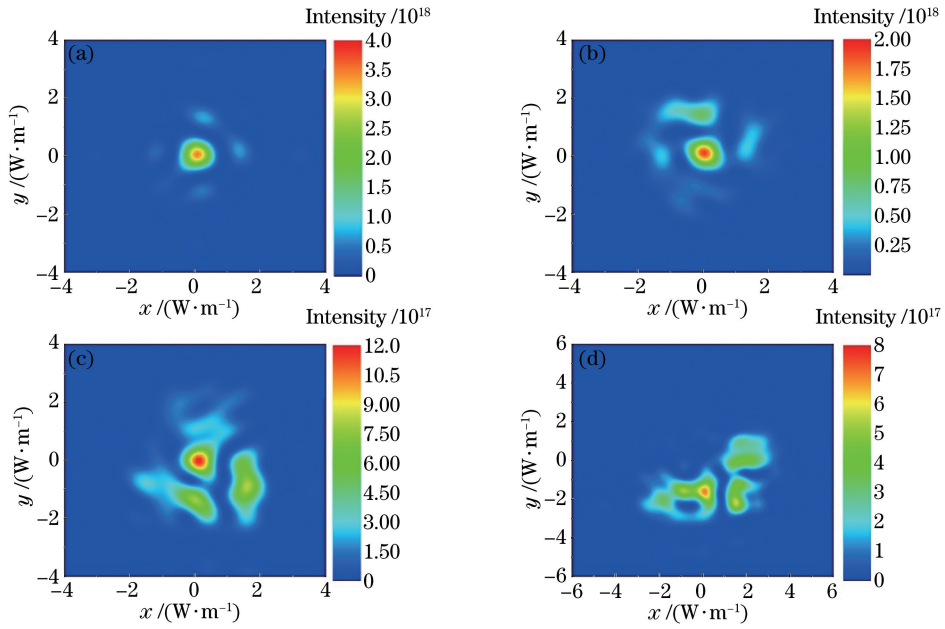


图 5 不同 $\Delta\theta_{\max}$ 下的的焦斑强度分布。(a) 0.005 mrad; (b) 0.008 mrad; (c) 0.010 mrad; (d) 0.016 mrad

Fig. 5 Intensity distributions of focal spots under different $\Delta\theta_{\max}$.

(a) 0.005 mrad; (b) 0.008 mrad; (c) 0.010 mrad; (d) 0.016 mrad

差的临界值 $\Delta\theta_{th}$ 的 40% 左右时, 焦斑的形态与理想形态比较接近, 峰值强度为理想条件下峰值强度的 80% 左右, 可有效提高实验的成功概率。

4.2 透镜的安装角度

由图 1 可知, 在采用非离轴透镜的集束系统中, 反射镜将光束以一定角度照射到透镜上, 使光束聚焦到靶点上。透镜角度姿态有两种, 如图 6 所示, 一种是垂直于整个集束系统的光轴 (即图中的 z 轴), 另一种是倾斜一定的角度以垂直于入射光。图 3(b) 中理想焦斑的分布是在第一种条件下计算的, 此处计算后一种条件下的焦斑分布。

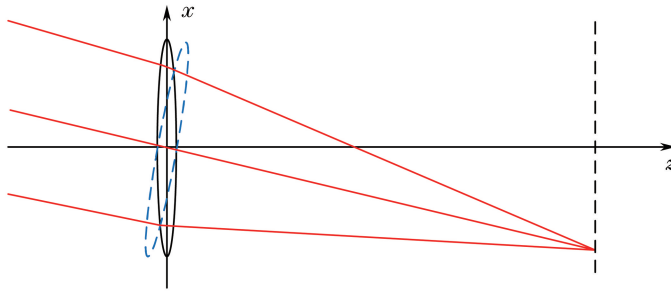


图 6 两种透镜角度姿态

Fig. 6 Two kinds of lens angle posture

如图 7(a) 所示为透镜倾斜时的焦斑分布, 与图 3(b) 所示的理想情况一致。从图 7(b) 的一维曲线对比也能看到, 两者几乎是重合的, 其峰值强度为理想情况下峰值强度的 98% 左右。由此可知, 两种条件下的透镜姿态都符合聚焦系统的需求。将透镜倾斜一定的角度, 在垂直于入射光的条件下, 透镜的角度设置一般与反射镜的角度相关, 大概在毫弧度量级, 目前的安装调校水平是可以达到的。从系统集成安装的角度来看, 第一种姿态即垂直于整个集束系统的光轴显然更合适、更方便。

4.3 透镜平移误差

使用非离轴透镜对光束进行聚焦时, 光束的中心应与透镜光轴完全重合, 但实际情况下两者存在误差, 这种误差叫做透镜的平移误差。平移误差会对光束的远场分布造成影响, 相当于光束通过了一个离轴透镜。在 2×2 集束聚焦系统中, 4 个透镜共需要 8 个坐标来描述实际情况下的位置, 每个透镜坐标可以表示为

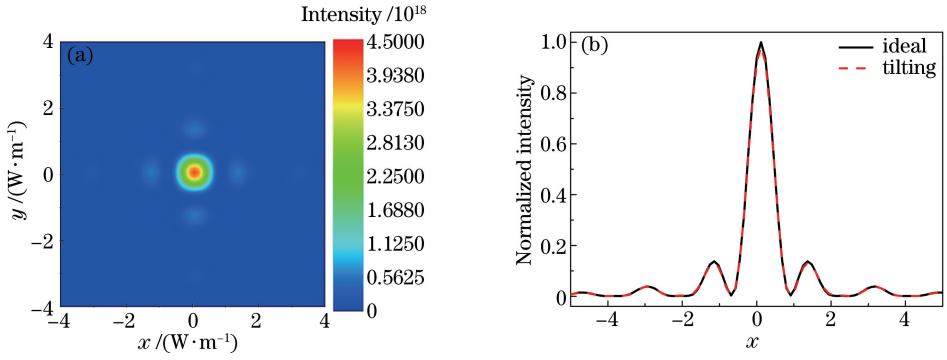


图 7 (a)透镜倾斜时的焦斑分布;(b)理想条件下与透镜倾斜时的焦斑强度一维曲线的对比

Fig. 7 (a) Focal spot distribution with tilted lens; (b) comparison of focal spot intensity one-dimensional curves under ideal condition and tilted lens condition

$$k = k_s \pm \Delta k_{\max}, \quad (7)$$

式中 k 为 x 或 y 坐标上的实际位置, k_s 为理想的坐标位置, Δk_{\max} 为坐标位置的最大误差。计算 Δk_{\max} 的改变对焦斑形态的影响, 8 个坐标在 $[k_s - \Delta k_{\max}, k_s + \Delta k_{\max}]$ 范围内随机取值, 以模拟实际情况中误差不可控的条件。

透镜位置的变化使光束在远场空间发生变化, 4 束激光不能完全相干, 导致焦斑质量变差。光束在远场空间的位置关系由图 4 及相关分析给出, 平移距离的临界值由(5)式给出。在所设定的装置 F 数条件下, $\Delta k_{\text{th}} = 0.026 \text{ mm}$ 。以 Δk_{th} 的量级为基准, 计算不同 Δk_{\max} 情况下系统的焦斑分布。图 8 为 Δk_{\max} 分别取 $0.010, 0.020, 0.025, 0.027 \text{ mm}$ 时焦斑强度的二维分布。从图中可以看出: 当 Δk_{\max} 很小时, 焦斑形态基本与理想焦斑保持一致; 随着 Δk_{\max} 的增大, 旁瓣逐渐变强, 主瓣的峰值强度降低; 当 $\Delta k_{\max} = 0.027 \text{ mm}$ 时, 超过临界值 Δk_{th} , 系统已无法保持正常的光束会聚。由此可知, 在采用非离轴透镜的聚焦系统中, 透镜的平移误差同反射镜角度一样也非常敏感。在 F 数比较小的激光装置中, 透镜平移误差的临界值通常在微米量级。这么小的量级很难直接调整, 考虑到反射镜的角度实际上也影响光束在远场的位置, 在实际安装调试过程

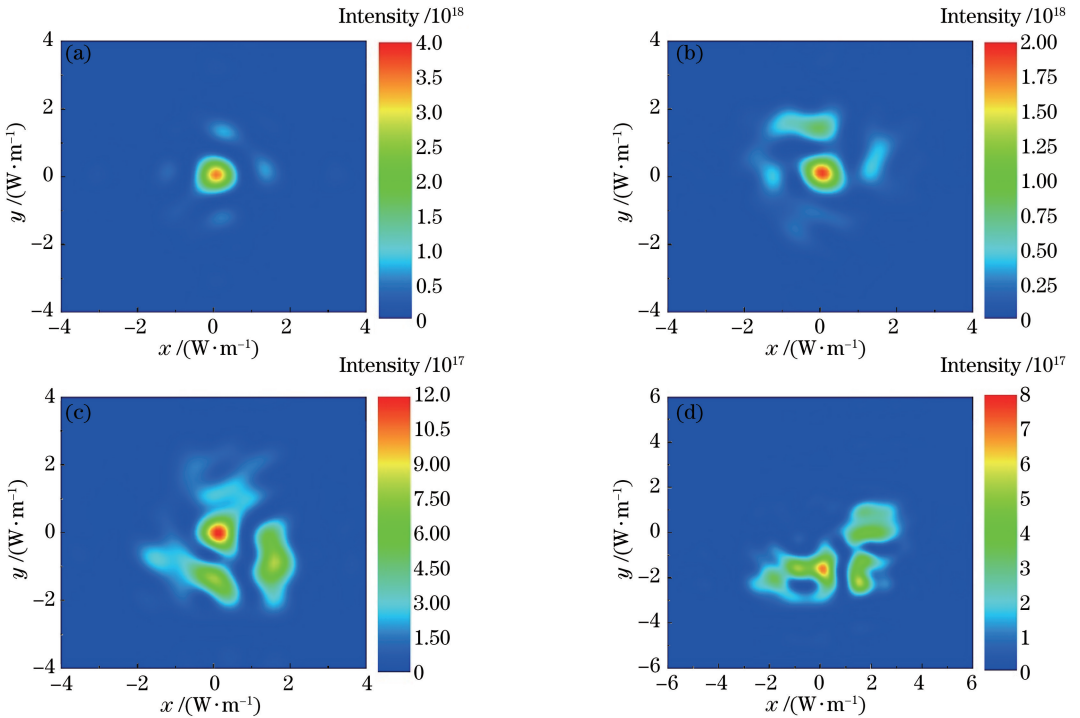


图 8 不同 Δk_{\max} 时的焦斑强度分布。(a) 0.010 mm ; (b) 0.020 mm ; (c) 0.025 mm ; (d) 0.027 mm

Fig. 8 Intensity distributions of focal spots under different Δk_{\max} . (a) 0.010 mm ; (b) 0.020 mm ; (c) 0.025 mm ; (d) 0.027 mm

中,可以由反射镜的调整减小平移误差,在透镜平移误差控制方面没有必须小于临界值的限制,误差要求可以大大放宽。此外,光束口径误差所引起的光束中心与透镜中心的误差也属于对准误差,与本节所分析的透镜对准误差类似,当透镜中心确定时,关键在于光束中心与透镜中心的偏差对聚焦效果的影响,其结果也类似透镜对准误差的结果。在现有的光束口径误差控制水平下,单纯的光束口径大小变化影响甚微。

4.4 透镜焦距误差

大口径光学元件的加工一直是高功率激光领域的关键点之一,加工精度对于元件的质量起着非常重要的作用。作为起聚焦作用的关键器件,大口径透镜的加工精度对光束质量有非常重要的影响。焦距是透镜的主要参数之一,他在实际加工过程中会有一定误差,实际的焦距可表达为

$$f = f_s + \Delta f_{\max}, \quad (8)$$

式中 f_s 为理想焦距, Δf_{\max} 为最大焦距误差。在 2×2 聚焦系统中共有 4 块透镜。改变 Δf_{\max} 计算系统焦斑的形态变化,4 个透镜的焦距值在 $[f_s - \Delta f_{\max}, f_s + \Delta f_{\max}]$ 内随机取值,同样可模拟实际焦距不可知的情况。

依据国内现有的加工水平和相关要求,大口径透镜的焦距误差需控制在 $0.1\% f$ 左右,集束的激光束数越多,透镜焦距误差不断累加,对系统的聚焦效果造成的影响也越大。图 9 为 Δf_{\max} 分别取 $0.1\% f$ 、 $0.2\% f$ 、 $0.3\% f$ 、 $0.5\% f$ 时的焦斑分布。从图中可以看到:在 $\Delta f_{\max} = 0.1\% f$ 时,焦斑的形态与理想状态下的形态比较接近,有一部分能量从主瓣分离;随着 Δf_{\max} 的增大,散斑数量明显增多,主瓣的峰值强度下降;当 $\Delta f_{\max} = 0.5\% f$ 时,出现了密集的多光束干涉阵列,此时主、旁瓣无法区别,聚焦系统已不能保持光束会聚。

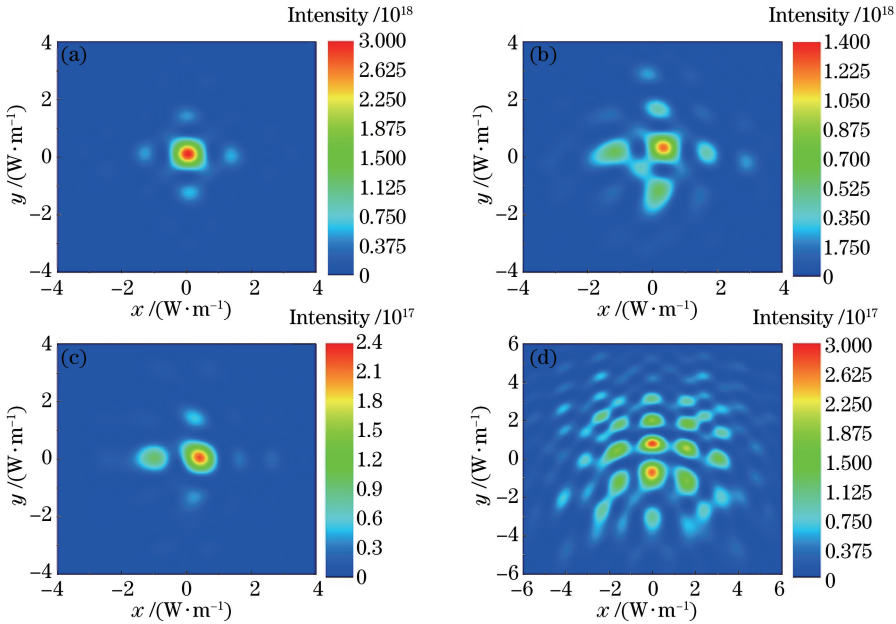


图 9 Δf_{\max} 为 (a) $0.1\% f$, (b) $0.2\% f$, (c) $0.3\% f$ 和 (d) $0.5\% f$ 时的焦斑强度分布

Fig. 9 Intensity distributions of focal spots when Δf_{\max} is (a) $0.1\% f$, (b) $0.2\% f$, (c) $0.3\% f$ and (d) $0.5\% f$

由上可知,焦距误差在 $0.1\% f$ 可满足非离轴透镜集束系统的要求,能保证系统有比较好的聚焦能力,焦斑形态也接近理想条件下的。图 9(a) 焦斑的峰值强度大约在理想焦斑的 70% ,基于多次计算结果,焦距误差在 $0.1\% f$ 时,峰值强度的平均水平在 75% 左右,要进一步提高主瓣强度,可以在比较精确地测量透镜焦距的条件下调整透镜在 z 轴的位置,尽量将理想的焦点位置落在靶点上。对于高功率激光装置中用到的大口径透镜, $0.1\% f$ 大约在数毫米量级,调整位置的补偿效果比较明显。当然,最根本的还是要提高透镜焦距的误差控制水平,才能大大降低装置的安装调校难度,提高透镜元件的复用率。

5 结 论

针对高功率激光装置中采用非离轴透镜的集束聚焦方式,建立了相应的物理模型,研究了实际情况下各种安装调试误差对焦斑的影响,分析了反射镜角度误差、透镜角度姿态、透镜对准误差及焦距误差对集束系

统聚焦性能的影响。在采用非离轴透镜的 2×2 集束聚焦系统里,反射镜的角度误差和透镜的平移误差影响最大,需要精密地控制。在小 F 数的激光驱动装置中,反射镜对光束的角度误差控制一般处在微弧度量级,在实际应用中需要精密的反馈控制系统来保证其精度至少达到临界值,控制反射镜的角度还可以补偿其他误差因素的影响,因此反射镜的误差控制最为重要。透镜平移误差的临界值很小,但通过调整反射镜的角度可以影响光束在远场的位置,所以这个误差因素的影响被加入到反射镜角度的因素中,其误差控制可以大大放宽。透镜的两种安装姿态对焦斑形态的影响不大,可以从方便安装调试的角度考虑如何设置。透镜的焦距误差以现有的加工水平来看可满足需求,也可以通过调整透镜的 z 向位置进行一定补偿,从实际的安装和应用角度,还需提高加工误差控制水平。采用非离轴透镜进行集束聚焦的方式理论上有很好的远场焦斑分布,非离轴透镜的加工要求也比离轴透镜的低,但实际使用时也存在一些难点。研究结果说明这种集束聚焦方式需要非常精密的安装调试手段,对激光相干合成集束方案有进一步的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Hunt J S. National ignition facility performance review 1999[R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 2000.
- [2] Ebrardt J, Chaput J M. LMJ project status[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112(3): 032005.
- [3] Zheng W, Zhang X, Wei X, *et al.* Status of the SG-III solid-state laser facility[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112(3): 032009.
- [4] Wang Meicong, Zhu Mingzhi, Chen Gang, *et al.* Research of transport beams arrangement in target area for large scale ICF facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011403.
王美聪, 朱明智, 陈刚, 等. 大型 ICF 装置靶场传输光路排布研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 011403.
- [5] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, *et al.* Description of the NIF Laser[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 25-145.
- [6] Qiao Zhanfeng, Lu Xingqiang, Zhao Dongfeng, *et al.* Arrangement design of the final optics assembly for the SG-II upgrading laser[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(9): 1328-1332.
乔战峰, 卢兴强, 赵东峰, 等. 神光 II 升级装置终端光学组件的排布设计[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1328-1332.
- [7] Li Fuquan, Han Wei, Wang Fang, *et al.* Research status of final optics assembly in high-power laser facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060002.
李富全, 韩伟, 王芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060002.
- [8] Guo Yinbiao, Yang Wei, Wang Zhenzhong, *et al.* Technology and application of ultra-precision machining for large size optic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 171-178.
郭隐彪, 杨炜, 王振忠, 等. 大口径光学元件超精密加工技术与应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 171-178.
- [9] Sun Xiaoyan, Lei Zemin, Lu Xingqiang, *et al.* Light intensity distribution of high-power laser beams on target plane under different focus system of 2×2 beam array[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(6): 064203.
孙晓艳, 雷泽民, 卢兴强, 等. 不同 2×2 集束聚焦方式下高功率激光靶面光强分布特性[J]. 物理学报, 2016, 65(6): 064203.
- [10] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. Qin Kecheng, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [11] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Yang Jiasun, Transl. Beijing: Science Press, 1978: 412-430.
玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 北京: 科学出版社, 1978: 412-430.
- [12] Liu Zejin, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.* The history, development and tend of coherent combining of laser beams[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2221-2234.
刘泽金, 周朴, 王小林, 等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2221-2234.
- [13] Ishaaya A A, Davidson N, Shimshi L, *et al.* Intracavity coherent addition of Gaussian beam distributions using a planar interferometric coupler[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(12): 2187-2189.
- [14] Ou Yigui, Li Wenya. Space analytic geometry[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009.
欧宜贵, 李文雅. 空间解析几何[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [15] Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.* Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602002.
母杰, 景峰, 王道, 等. 相干合成中基于 SPGD 算法的平移误差和倾斜误差控制[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602002.