

高功率固体激光装置聚焦终端的 90° 拼接 离轴抛物面镜设计

杨雨川^{1,2} 景峰² 李富全² 王逍² 黄小军² 冯斌² 罗晖^{1*}

(¹国防科学技术大学光电工程学院, 湖南长沙 410073
²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要 离轴抛物面镜广泛应用于高能短脉冲激光装置的无像差聚焦打靶,随着对焦斑能量的需求越来越高,大多采用多路激光聚焦打靶,对聚焦元件提出了新的要求。大口径拼接抛物面镜可确保光学元件面型精度优于 $\lambda/4$,且具有较好的可扩展性,90°离轴设计能有效增加激光的聚焦效率。基于几何光学和衍射光学,分析了90°拼接离轴抛物面镜作为聚焦终端时,拼接子镜的角度和位置失调对聚焦光斑的影响。结果表明,面外角度倾斜和光轴方向面外位置失调对焦斑斯特列尔比和20 μm 直径环围功率比的影响远大于面内旋转角和位置失调,在进行拼接设计时无需补偿面内失调量;计算得到角度倾斜与位置失调的精度分别为 $\pm 0.5\ \mu\text{rad}$ 和 $\pm 105.3\ \text{nm}$,并采用蒙特卡罗误差分析对拼接后抛物面镜的空间聚焦性能进行了预测,在该精度条件下可满足要求。

关键词 光学器件;90°抛拼离轴接物面镜;高功率固体激光装置;角度倾斜与位置失调参数

中图分类号 O438.2

OCIS 120.3620,120.4570,120.4640

文献标识码 A

Design of 90° Tiling off-Axis Parabolic Mirror Based on Focusing Terminal of High-Power Solid-State Laser

Yang Yuchuan^{1,2} Jing Feng² Li Fuquan² Wang Xiao² Huang Xiaojun²
Feng Bing² Luo Hui^{1*}

(¹College of Optic-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China
²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Off-axis parabolic mirror is extensive used in non-aberrant targeting by high energy short-pulse solid-state laser. With the incremental requirement for focal energy, the multi-laser focal target is often applied, which puts forward a new request for focusing element. The large-bore tiling parabolic mirror can ensure more that the profile accuracy is over $\lambda/4$ and has good augmentability. 90° off-axis design can effectively increase focal efficiency. Based on geometrical optics and diffraction optics, the focal character of 90° off-axis segmented parabolic mirrors has been studied and the misalignment of angle and position are concerned. The results show that the out-of-plane tilt/tip and piston are the main factor affecting strehl ratio and power ratio in a 20 μm -dia meter barrel, discarding the in-plane rotary and decent in active control. The accuracy of tilt/tip and piston are respective $\pm 0.5\ \mu\text{rad}$, $\pm 105.3\ \text{nm}$, and the focal performance is predicted by Monte-Carlo tolerance analysis. Under the situation, the ideal focal spot can be afforded for application.

Key words optical devices; 90° tiling off-axis parabolic mirrors; high-power solid state lasers; tilt/tip-piston parameters

收稿日期: 2010-03-09; 收到修改稿日期: 2010-08-12

基金项目: 国家 863 计划项目(2009AA8044005), 激光聚变实验室和激光研究中心创新基金项目(20090604)资助课题。

作者简介: 杨雨川(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光器相干组束方面的研究。E-mail: yyc_online@126.com

导师简介: 罗晖(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事激光检测方面的研究。E-mail: luohui.luo@163.com(通信联系人)

1 引言

在 高能短脉冲激光装置中,单束脉冲的能量远不能够满足实验要求(快点火方案需要 100 kJ 的激光能量实现高增益的核聚变),研究者们开始尝试多束超短脉冲在远场叠加的方法以获得足够的能量和功率密度^[1,2]。在建的大型固体激光装置包括日本 LFEX(Laser for Fast Ignition Experiment)设计目标将实现 2×2 路光束的相干聚焦,美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)^[3]的 ARC(Advanced radiography capability)将对 5 组 2×2 路光束进行相干聚焦^[4],欧洲 HiPER(High Power Laser Energy Research Facility)装置则规划 24 路激光在时间空间上完成相干聚焦,受限于大口径非球面光学元件的面型加工能力及其扩展性的要求,设计者提出利用类似于天文望远镜的拼接技术实现终端拼接聚焦^[5]。

设计和分析拼接天文望远镜聚焦特性的方法主要包括几何光线追迹和傅里叶变换,文献[6]采用几何光线追迹设计了 VLOT(Very Large Optical Telescope)的集成模型,文献[7~9]采用傅里叶变换理论分析了拼接望远镜的衍射特性。前者计算方便设计简单,但是焦面上的点状分布图不足以描述拼接元件的实际性能,直接采用傅里叶变换可以较好地描述拼接子镜间错位误差对聚焦特性的影响,但是当包含子镜角度失调时计算复杂度将大大增加。考虑到高能短脉冲固体激光装置输出激光脉宽为皮秒量级,在 1 ps 时间内脉冲经过 3 mm 传输距离,而经过自适应光学系统校正后的近场波前误差在微米量级,多个光波波列不重叠的部分对于整个波列长度而言是个非常小的量,满足时间相干性的要求,因此采用以上方法仍可用于分析聚焦终端的空间相干性。

本文在分析 2×2 拼接 90° 离轴抛物面镜的聚焦特性时,同时采用了几何光学追迹和傅里叶变换两种方法,几何光学追迹得到系统失调带来的出瞳波前误差,傅里叶变换将该波前误差对聚焦性能的影响反映到焦斑形态上,确定面内和面外倾斜角和位置失调量对焦斑形态的影响,从而给出角度和位移量的控制精度,并采用蒙特卡罗误差分析方法预测精度范围内系统的聚焦性能。

2 模型建立及其求解

2.1 光源到像面的光线追迹

假定入射光为带权重(表征空间光强分布)的矩形光束,并采用矩形阵列表示入射波阵面,如图 1 所示,取图中任一点,如图 2 所示,由已知偏角值可得相应的入射方程与抛物面方程(F 表示横向焦距, f 表示纵向焦距):

$$x^2 + z^2 = 2fy. \quad (1)$$

联解(舍去大的假解),可得入射光与抛物面交点 (x_0, y_0, z_0) 。由(1)式可得交点处抛物面法线为

$$\frac{x - x_0}{x_0} = \frac{y - y_0}{-f} = \frac{z - z_0}{z_0}, \quad (2)$$

利用入射线、反射线及法线间夹角关系,可得反射线方向角 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ 。反射线为

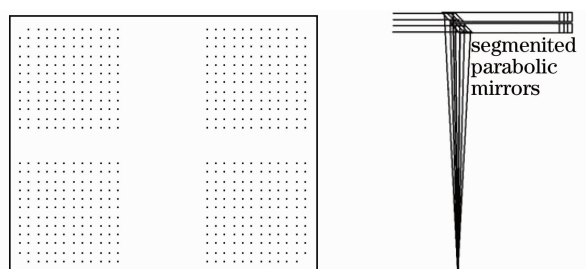


图 1 入射点光阵和对应 2×2 几何追迹示意图
Fig. 1 Incident laser lattice and corresponding 2×2 ray tracing map

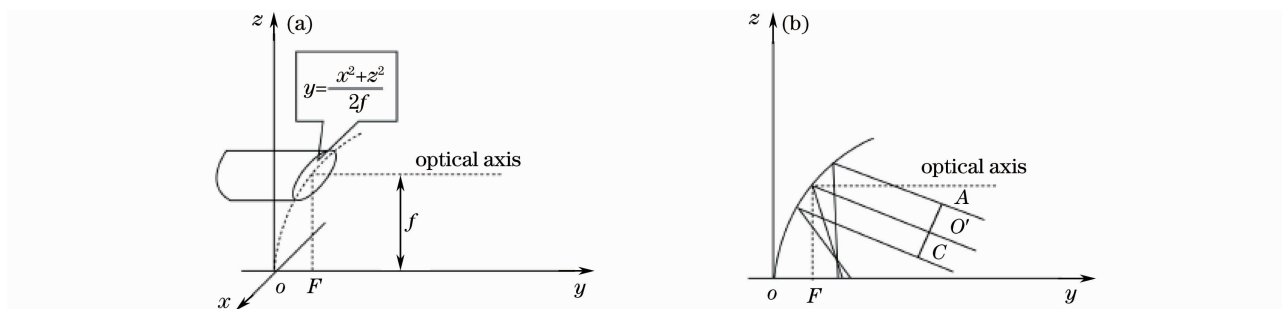


图 2 抛物面镜离轴 90° 示意图。(a) 坐标系示意图, (b) 抛物面镜对激光束的聚焦

Fig. 2 Schematic diagram of 90° off-axis parabolic mirror. (a) coordinates schematic, (b) laser beam focused by a parabolic mirror at misalignment angle of θ

$$\frac{x-x_0}{\cos \alpha_0} = \frac{y-y_0}{\cos \beta_0} = \frac{z-z_0}{\cos \gamma_0}. \quad (3)$$

可求得任意 z 平面内对应光点位置,取遍图 1 中各点,且以相应点处的光强为权值,可得任意 z 平面内光斑形状及大致光强分布。

2.2 出瞳位置光程差

已知追迹光线在像面的交点及方向余弦值,反向追迹到出瞳位置^[12],可得到焦斑到出瞳位置的光程差,具体过程如图 3 所示。

像面到出瞳面的主线路程为

$$d_c = \sqrt{L^2 + X_c^2 + Y_c^2}, \quad (4)$$

式中 L 表示出瞳面到像面的距离, X_c 和 Y_c 表示主线与像面的交点。像面上其他追迹光线与像面交点到主线交点的距离为

$$d_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - X_c)^2 + (y_{ij} - Y_c)^2}, \quad (5)$$

式中 x_{ij} 和 y_{ij} 表示其他非主线追迹光线与像面的交点坐标。从像面上计算空间追迹光线立体角余弦值

$$\Theta = \left| \frac{(x_{ij} - X_c)}{d_{ij}} \cos \alpha_{ij} + \frac{(y_{ij} - Y_c)}{d_{ij}} \cos \beta_{i,j} \right|, \quad (6)$$

式中 α_{ij}, β_{ij} 表示追迹光线与像面交点 (i, j) 的反射光线方向角。像面到出瞳面的其他追迹光线相对主线的程差

$$d_{\text{image} \rightarrow \text{exit pupil}} = d_{ij} \Theta + \sqrt{d_{ij}^2 (\Theta^2 - 1) + d_c^2} - d_c. \quad (7)$$

实际情况考虑光源位置到出瞳的光程差,最终可以得到光源到出瞳的光程差为

$$d_{\text{image} \rightarrow \text{exit pupil}} = d_{\text{source} \rightarrow \text{image}} - d_{\text{source} \rightarrow \text{image}} (\text{chief ray}) + d_{\text{image} \rightarrow \text{exit pupil}}. \quad (8)$$

经过两次光学追迹后得到出瞳位置的光程差 $d_{\text{source} \rightarrow \text{exit pupil}}$,复振幅由振幅和相位构成,振幅为光强空间分布 $u(x, y)$,复振幅表示为 $u(x, y) \cdot \exp(i \cdot d_{\text{source} \rightarrow \text{exit pupil}})$ 。出瞳面波前包含了系统引入的所有误差,则从出瞳面到焦面可认为理想衍射聚焦,因此对出瞳面复振幅进行移相傅里叶变换求和,可以得到反映系统误差的焦面复振幅及其光强分布。

3 讨论角度和位置失调量

以国内某原型装置光束排布作为合束模型,单光束口径 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$,沿 x 和 y 方向的孔径间隔分别为 230 和 70 mm ,离轴抛物面镜实现光线 90° 偏转聚焦,焦距 $f=4 \text{ m}$ 。每路光束截面的光强在通光孔径内并非均匀分布,而是进行了边沿软化,采用超高斯方形光束来描述传播光束的截面空间分布 $u(x, y) = \exp\{-[(x/R_0)^{2n} + (y/R_0)^{2n}]\}$, $R_0 = 11 \text{ cm}$ 为光束束腰, $n = 10$ 为阶数,图 4 给出了子孔径光束振幅的归一化分布。下面将讨论拼接子镜 6 维调整量对焦斑形态的影响,子镜局部坐标系和调整量:面内绕 z 轴旋转角和面外倾斜角(绕 x/y 轴的旋转角度),面内 x 和 y 方向偏心量和面外位移失调,如图 5 所示。

3.1 角度失调

图 5 的局部坐标系绕 z 轴进行面内旋转和绕 x, y 轴发生面外倾斜将偏离抛物面方程,影响焦斑形态和聚焦位置,本文采用焦斑斯特列尔比(焦斑峰值强度与理想条件下的焦斑峰值强度的比值)和 $20 \mu\text{m}$ 直径环围功率比(焦面中心 $20 \mu\text{m}$ 直径内的功率与焦面总功率的比值)描述焦斑质量和中心能量集中度。图 6 给出了拼接抛物面

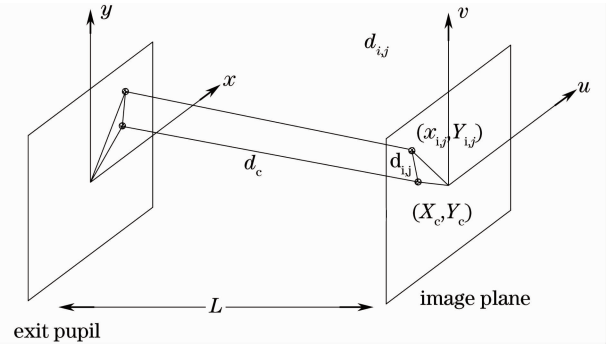


图 3 像面到出瞳的反向追迹

Fig. 3 Inverse ray tracing from image plane to exit pupil

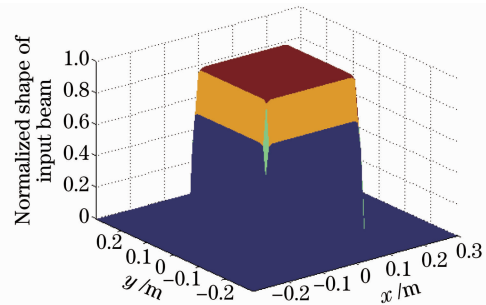


图 4 通光孔径振幅的归一化分布示意图

Fig. 4 Normalized amplitude function of masking aperture

镜中某个子镜角度失调对焦斑斯特列尔比和包围功率比的影响情况。计算表明,左右倾斜对焦斑斯特列尔比和包围功率比的影响最大,面内旋转角的影响最小,结构模态分析的结果也表明面外角度振动幅度远大于面内旋转变形,因此不需要对面内旋转角进行主动控制,综合考虑环境振动因素确定驱动器控制精度为 $1 \mu\text{rad} (\pm 0.5 \mu\text{rad})$ 。图 7(a)和(b)给出了角度倾斜失调情况下,焦面干涉图样的变化,可以看出,光斑中心位置向着失调角偏离方向移动,导致焦面中心圆域内的能量越来越小,相同失调角度的面内旋转对焦斑移动的影响远小于角度倾斜,如图 7(c)所示。

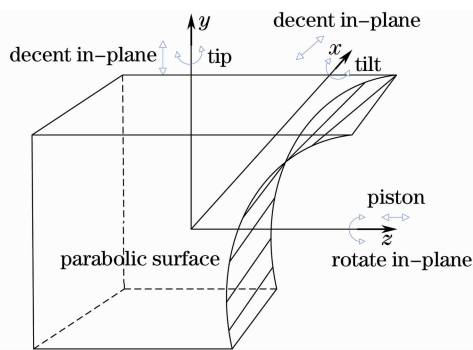


图 5 抛物面镜子镜的局部坐标示意图
Fig. 5 Local coordinate of segmented mirror

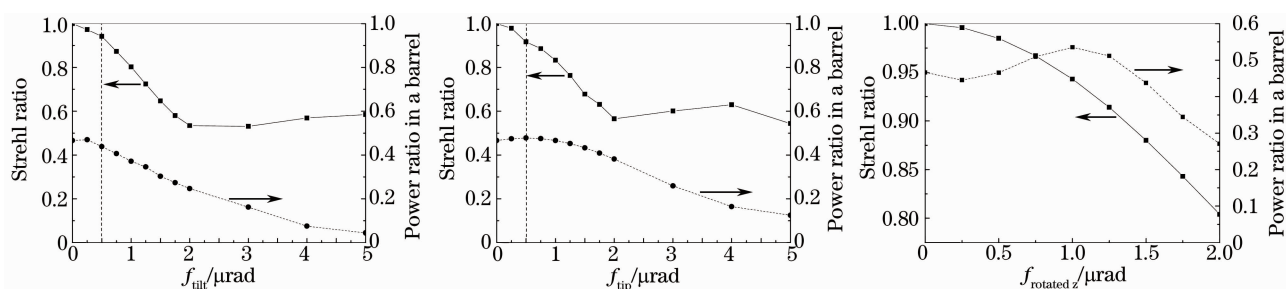


图 6 通光孔径振幅的归一化分布示意图

Fig. 6 Normalized amplitude function of masking aperture

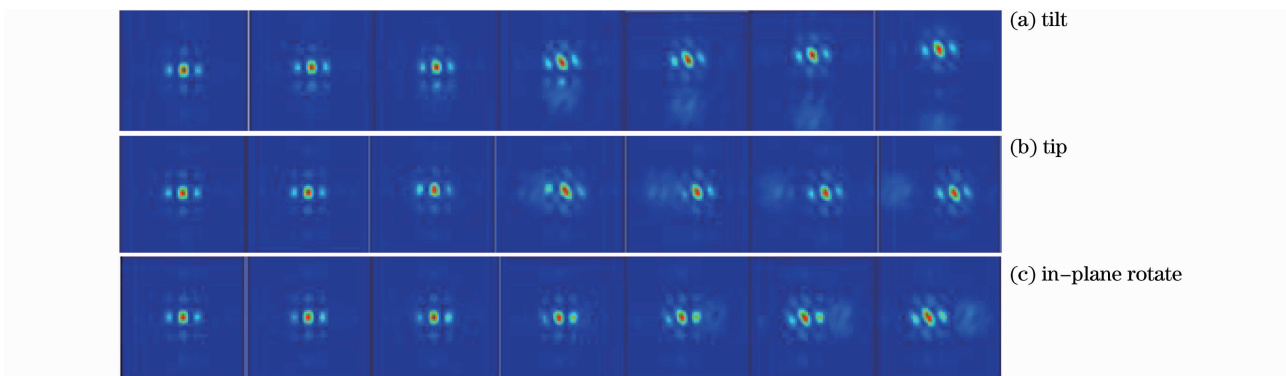


图 7 焦面干涉图样(失调角度:0,0.5,1,2,3,4,5 μrad)

Fig. 7 Interference pattern of focal plane (misaligned angle: 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 μrad)

3.2 位置失调

据抛物面公式 $2fy = x^2 + z^2$,当子镜沿着 x 和 z 方向平移,抛物面的焦点位置也将随着面内平移而移动,图 8(a)给出了反射光线的几何图示,图 8(b)和(c)反映了子镜在 x 和 z 方向平移 $200 \mu\text{m}$ 后的焦面干涉

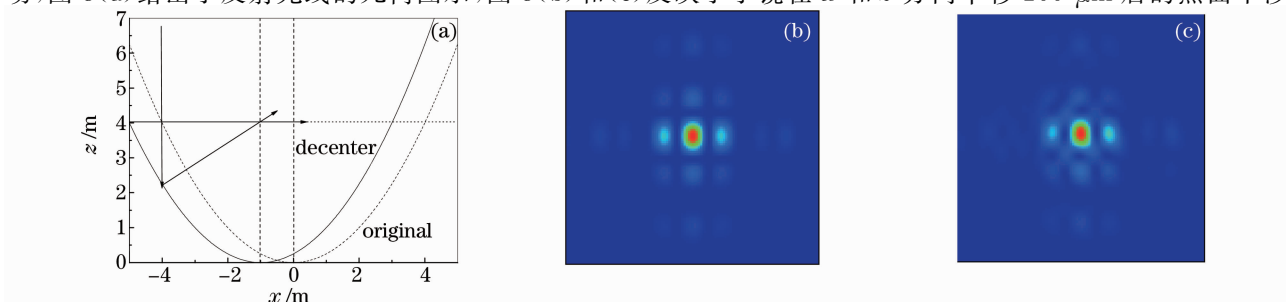


图 8 面内平移量对离轴抛物面镜聚焦特性的影响

Fig. 8 In-plane decent effect on focal character of segmented parabolic mirrors

图样; x 方向的平移几乎不影响焦斑形态和位置, z 方向平移 $200\ \mu\text{m}$ 后焦斑斯特列尔比和环围功率比分别下降到 0.808 和 0.443 , 因此在进行主动控制时可忽略面内平移的影响。

单独分析 z 方向平移位置失调量对焦斑斯特列尔比和环围功率比的影响, 如图 9 所示。图中斯特列尔比和环围功率比以波长为周期呈正弦变化, 且在 0.2λ 范围内斯特列尔比和环围功率比具有相同的变化趋势, 由此确定平移量控制精度为 $\pm 105.3\ \text{nm}$ ($\lambda = 1.053\ \mu\text{m}$, $\pm 0.1\lambda$)。为了让结果更直观, 图 10 分别给出了 $0.2\lambda, 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda, 0.8\lambda$ 位置的焦面干涉图样, 位置失调不改变焦斑重心位置因而大于 3 倍衍射极限内的环围功率起伏较小, 主要影响焦斑形态, 当 $f_{\text{piston}} < 0.5\lambda$ 焦斑左旁瓣能量大于右旁瓣, $f_{\text{piston}} > 0.5\lambda$ 时焦斑右旁瓣转能量大于左旁瓣, 在 0.5λ 位置具有明显的焦斑分裂, 此时斯特列尔比最低。

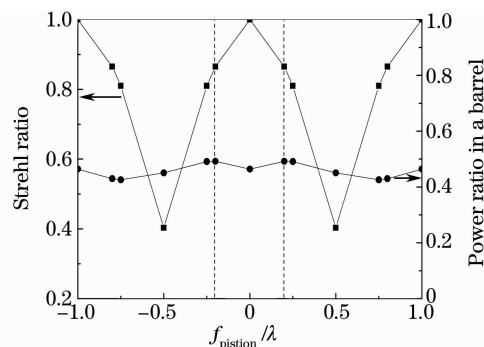


图 9 斯特列尔比和环围功率比随面外平移量的变化
Fig. 9 Strehl ratio and power ratio in a barrel versus piston

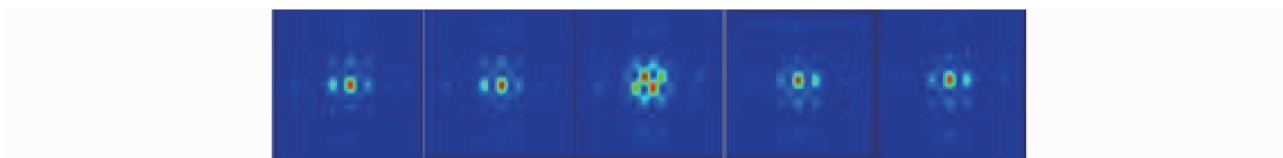


图 10 焦面干涉图样 (piston 失调位置: $0.2\lambda, 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda, 0.8\lambda$)

Fig. 10 Interference pattern of focal plane (piston decent: $0.2\lambda, 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda, 0.8\lambda$)

4 系统性能的蒙特卡罗容限分析

采用蒙特卡罗方法对 12(4 子镜, 3 参数) 个独立参量进行误差容限分析: 每次蒙特卡罗循环, 在设定参数精度范围和干扰统计模型内随机产生特定的误差值, 所有误差参数服从正态统计分布, 统计次数均为 100 次。蒙特卡罗误差分析估计了符合误差设定条件下真实的系统性能, 统计结果对于工程任务是非常有用的, 但是因为采样率不够不一定严格遵循统计结果, 然而蒙特卡罗误差分析却揭示了误差范围内所预测系统性能的概率, 对于光学系统而言仍是非常重要的分析方法^[13]。图 11 可以看出在 tilt/tip-piston 的误差范围内斯特列尔比超过 60% 的统计次数落在大于 0.8 (理想条件下 1) 的范围内, 环围功率比超过 60% 的统计次数落在大于 0.4 (理想条件下 0.464) 的范围内, 此时聚焦打靶的成功率 (斯特列尔比大于 0.8, 环围功率比大于 0.4) 达到 60%, 文献[3, 4]中 NIF 要求超短脉冲驱动系统的角度漂移均方根误差控制在 $\pm 1\ \mu\text{rad}$ 范围内, 与本文相比放宽了控制要求, 但需要明确的是该设计目标针对的是 $40\ \mu\text{m}$ 直径环围功率比。

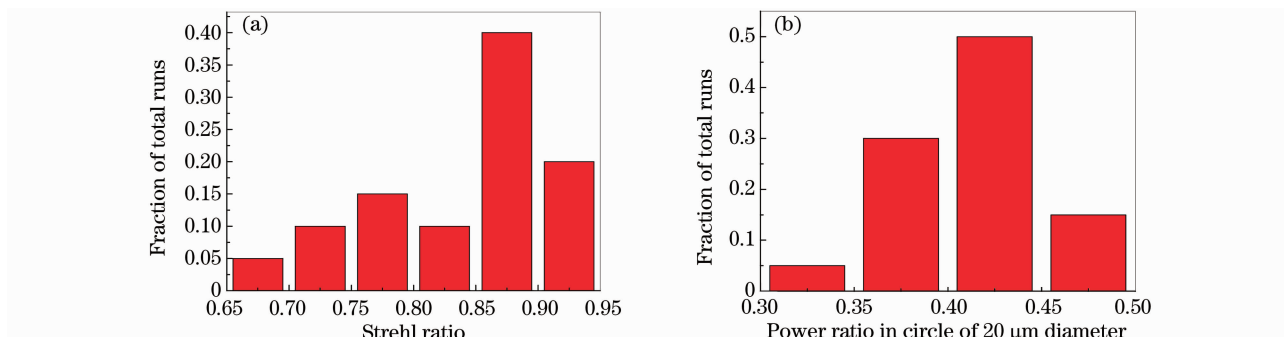


图 11 斯特列尔比(a)和环围功率比(b)的蒙特卡罗容限分析统计结果

Fig. 11 Histograms of Strehl (a) and power ratio (b) by Monte-Carlo tolerance analysis

5 结 论

结合几何光学追迹和傅里叶变换的计算特点,建立了 2×2 的 90° 拼接离轴抛物面镜模型进行了仿真计算,分析了3维面内外角度和3维位置失调参数对 90° 拼接离轴抛物面镜聚焦特性的影响。计算表明,角度倾斜对焦斑形态的影响相似, $2\ \mu\text{rad}$ 的角度偏差导致斯特列尔比小于0.6,但左右倾斜对焦斑中心偏移的影响更为严重,当 $f_{\text{tilt}}=5\ \mu\text{rad}$ 焦面中心 $20\ \mu\text{m}$ 直径圆内的环围功率比趋近于零,面内角度旋转对焦斑形态和位置的影响不敏感无需主动控制;位置失调主要是面外位置失调量影响焦斑形态,斯特列尔比和环围功率比以波长为周期呈正弦变化;拼接需要对角度倾斜和位置失调进行主动控制,精度分别为 $\pm 0.5\ \mu\text{rad}$ 和 $\pm 105.3\ \text{nm}$,对应拼接引入的倾斜相位峰谷误差为 $0.28\ \lambda$,平移位相误差为 $\lambda/5$ 。在该精度条件下,采用蒙特卡罗误差分析方法预测拼接系统的聚焦性能,斯特列尔比大于0.8和环围功率比大于0.4的概率超过60%,具有较好的聚焦特性,对于实现大型高能短脉冲固体激光装置的打靶聚焦终端设计和装配具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 T. Tajima. Report on the ELI Science[R]. Europe: Extreme Light Infrastructure, 2009
- 2 M. Dunne, F. Amiranoff, S. Atzeni *et al.*. A Future European High Power Laser Facility[R]. UK: CCLRC Rutherford Appleton Laboratory, 2005
- 3 K. L. Baker, E. A. Stappaerts, D. C. Homoelle *et al.*. Interferometric adaptive optics for high power laser pointing, wave-front control and phasing[C]. *SPIE*, 2009, **7209**: 720907
- 4 K. L. Baker, D. Homoelle, S. M. Utterback *et al.*. Phasing rectangular apertures[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 19551~19565
- 5 H. K. Michael. Fast Ignition[R]. LLNL-PRES-415135, 2006
- 6 Roberts Scott, C. Pazder John, S. Fitzsimmons Joeleff F *et al.*. Integrated modeling of the canadian very large optical telescope[C]. *SPIE*, 2004, **5382**: 346~355
- 7 C. Gary, T. Mitchell. Strehl ratio and modulation transfer function for segmented mirror telescopes as functions of segment phase error[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6642~6647
- 8 Mitchell T., Gary C.. Diffraction effects from giant segmented-mirror telescopes[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(19): 3745~3753
- 9 Chen Rongli, Zhang Tao, Ma Zhen *et al.*. Influence of the alignment errors on image quality of large segmented mirrors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3240~3244
陈荣利, 张涛, 马臻等. 拼接误差对拼接式大口径反射镜成像质量的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3240~3244
- 10 Shi Hongbin, Cheng Zhaogu, Xu Guoliang *et al.*. Study on focusing spot characteristic by off-axis parabolic mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(10): 880~886
石鸿斌, 程兆谷, 许国良等. 激光束经离轴抛物面镜聚焦后光斑特性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(10): 880~886
- 11 Luo Xi, Cheng Peifeng, Wang Ying. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 682~687
罗曦, 陈培锋, 王英. 离轴 90° 抛物面镜焦斑特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 682~687
- 12 Born M., Wolf E.. Principles of Optics[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978
玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978
- 13 Xu Zhongji. Monte-Carlo[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 1985
徐钟济, 蒙特卡罗[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985