

高功率激光光场耦合的准直光学系统

杨野^{1,2**}, 邬融^{1*}, 孙明营¹, 田玉婷^{1,2}, 邵平¹, 夏兰³

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 为适应高功率激光系统的紧凑空间需求, 将基于二阶鬼像的远近光场耦合方案应用于高功率激光准直技术中, 设计并搭建出灵敏的小型准直光学系统。提出完备的测试方案, 验证了该方案的可行性, 获得近场测量灵敏度为 $7.04 \mu\text{m}/\text{pixel}$, 远场测量灵敏度为 $18.14 (")/\text{pixel}$, 并得到远场变化对近场的影响关系, 用以优化光束校准。相比于传统远、近场分离的准直系统, 该方案在满足成像质量和分辨率要求的同时, 大幅缩减了光路和器件数量, 远、近光场相互影响和校准的反馈处理更便捷。

关键词 激光光学; 光场耦合; 透镜系统设计; 高功率激光; 精密准直; 鬼反射成像

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0805001

Collimation Optical System with Light Field Coupling of High-Power Lasers

Yang Ye^{1,2**}, Wu Rong^{1*}, Sun Mingying¹, Tian Yuting^{1,2}, Shao Ping¹, Xia Lan³

¹National 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;

³Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract To adapt to compact space requirements of high power laser system, a far-field and near-field coupling scheme based on second order ghost image is used in high power laser collimation technology. A sensitive small-size collimation optical system is designed and built. We present complete test scheme and verify its feasibility. The near-field measurement sensitivity is $7.04 \mu\text{m}/\text{pixel}$ and the far-field measurement sensitivity is about $18.14 (")/\text{pixel}$. The influence of far-field change on near-field is researched and used to optimize beam collimation. Compared with traditional collimation system of far- and near-field separation, this scheme sharply reduces the number of light paths and devices under the condition of imaging quality and resolution assured. It is more convenient to feedback the interaction effect and collimation of far-field and near-field.

Key words laser optics; optical field coupling; lens system design; high power laser; precise alignment; ghost reflections

OCIS codes 140.3295; 220.3620; 140.3460; 220.1140

1 引言

传统激光光路的准直单元需对入射光进行分束, 分别测量近场和远场信息, 占用大量空间。随着高功率激光精密物理研究的不断深入, 惯性约束聚变高功率激光系统对激光路数、光路长度与元件数目等需求随其对激光性能要求的提高而急剧增大, 对准直精度的要求和准直测量点数量的要求也越来

越高, 但预留给对应准直系统的空间却越来越少^[1-2]。

由于高功率激光准直系统对空间的限制, 新的远、近光场耦合方案具有极大的应用前景。该方案仅需同一光学结构, 使近场和远场信息成像于同一像面, 空间占用更小。其最先在美国国家点火装置 (NIF: National Ignition Facility) 的先进辐射照相 (ARC: Advance Radiographic Capability) 项目中被

收稿日期: 2018-01-16; 修回日期: 2018-03-02; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 中国科学院高功率激光物理重点实验室基金 (CXJJ-16S040)

* E-mail: 46438131@qq.com; ** E-mail: 272555663@qq.com

提出,使用二阶鬼像的双焦距结构实现了耦合方案,但未给出具体的设计参数^[3-5]。相比于传统光场准直测量结构,该方案使用二次反射结构进行远场的会聚成像,因此能在更小的占用空间下,获得更灵敏的远场指向检测。目前国内主要是传统准直方式,近场精度为微米至毫米级,远场指向精度可达微弧度至毫弧度^[1-2,6-9]。远、近场同光路耦合的准直方案研究引起了学者们的关注。

为了适应高功率激光系统的空间需求,本文在原 ARC 系统的理论基础上,针对“神光 II”装置准直要求,结合光学成像分析和准直系统构架要求,设计并加工出了适用于高精度激光准直的远、近光场耦合光学系统。提出测试方案,采集得到适合算法处理的成像图案,实验获得该系统的远、近光场准直灵敏度,验证了该光学系统的可行性,为后续高功率激光装置的准直应用提供参考。

2 远、近光场耦合准直光学系统

2.1 新型远、近光场耦合的准直理论

光路的准直测量是在不干扰主光路的前提下,检测光束的近场和远场信息。通常准直系统需要对测量光束进行分束,分别检测远场与近场,这就需要两套光学结构和传感器结构,占用大量空间。

新型的远、近光场耦合准直方案利用二阶鬼像成像原理^[10-12]实现了对传统高功率激光准直系统的优化,减小占用的空间,设计结构如图 1 所示。光学测量系统包括 1 个参考物(十字细叉丝)、1 组望远结构及 1 个基于二阶鬼像成像的双焦透镜。在设计时,双焦透镜需在调整近场成像大小的同时,对光场远场进行成像会聚。

入射光经过系统成像获得 3 个特征部分。十字暗影为整个成像图案的坐标参考,其成像来自透镜最前端的参考物对光束的遮挡。亮圆图案表征入射

光束近场信息。中心强亮点表征入射光束远场信息。由此,入射光的近场和远场耦合成像于同一像面,减小了大量的占用空间。

2.2 远、近光场耦合光学系统设计

设计的光学系统以“神光 II”装置准直要求(光束的指向稳定性优于 2.1", 横向定位精度小于 30 μm)为设计基础,并尽量减小装置空间长度,入射光以小口径 30 mm、基频 1053 nm 光束为参考。使用的图像采集器件应为高精度 CCD 或 CMOS,以 Edmund 公司的型号为 acA4600-10uc 的 CMOS 为例,主要光学参数见表 1。为满足图像处理要求,远场会聚光斑应不小于 5 pixel×5 pixel 的点阵,以便亚像素算法高精度求解远场光斑的轮廓和移动参数。

表 1 CMOS 部分光学参数

Table 1 Partial optical parameter of the CMOS

Optical Parameter	CCD size / (mm×mm)	CCD pixels	Pixel size / (μm×μm)
Value	6.16×4.62	4608×3288	1.4×1.4

设计的光学系统由望远结构和双焦结构组成,参数如表 2 所示,其中双焦结构下的两种会聚光路分别和望远结构构成近场和远场的成像光路。入射光束为平行光束,波长为 1053 nm,入射光直径约为 30 mm。

为尽可能减少筒长,以满足小型化要求,望远结构选择反远距结构形式。反远距结构有较好的像面照度均匀性,同时具有较长的后焦距,便于实验对焦校正。望远部分初始结构为双片式,由 1 片凹透镜和 1 片凸透镜组成。经整体成像优化后,使用两片凸透镜结构替代原单一凸透镜来提升成像质量,再次优化参数,形成三片式球面反远距光学结构。

双焦距结构为系统设计难点。因需考虑使双光路同时完备成像,双焦透镜采用非球面结构,在多重数据结构下优化获得。第 1 重结构为完整近场光路,物点位于参考物处,经双焦透镜时直接透射成像,使近场图案在像面形成半径毫米级的圆形光斑。第 2 重结构为完整远场光路,物点位于无穷远处,经双焦透镜表面二阶鬼反射后成像于像面,形成一个直径约为 10 μm 亮焦斑。此时双焦透镜鬼反射会聚的物点位于望远结构后焦点处。双焦透镜需镀特殊反射率膜层,以调整远场鬼像成像与近场正常成像的光强对比度。

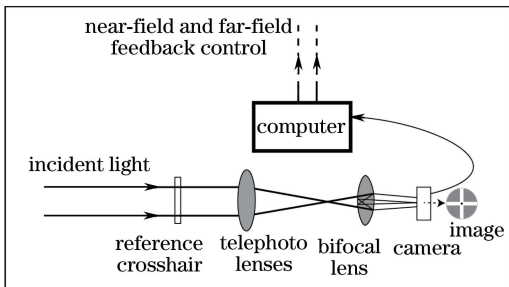


图 1 远、近光场测量的双焦结构的光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system with bifocal structure measured by far-field and near-field

表 2 光学系统的结构参数

Table 2 Structure parameters of optical system

Face	1	2	3	4	5	6	7	8
Radius /mm	-770	125.5	287	-301.5	131.25	-2056	23.896228	-34.38
Thickness /mm	10	50	10	100	10	276.0422548	30	22
Glass	BK7		SF2		BK7		BK7	
Conic	0	0	0	0	0	0	-1.39001	0

2.3 远、近光场耦合光学系统仿真分析

2.3.1 远、近光场耦合光学系统像质分析

根据准直系统要求,选取适当视场范围,获得完整远、近光场测量光路的点列图,如图 2、3 所示,远、近场光路成像性能均达到衍射极限。近场成像方均根半径为 $1.73 \mu\text{m}$,艾里斑直径为 $8.07 \mu\text{m}$,成像放大率为 $M_0 = 0.16506$,畸变为 $5.78 \times 10^{-5} \%$ 。远场成像方均根半径为 $0.2 \sim 3.4 \mu\text{m}$,艾里斑直径约为 $10.36 \mu\text{m}$,畸变为 0.05% ,波像差小于 0.1λ (λ 表示波长),构成完备成像条件。光学系统成像质量良好,各项指标均满足设计要求。因衍射限制,实际成像光斑尺寸不小于艾里斑,因此远场会聚点直径不小于 $10.36 \mu\text{m}$,满足 CCD 成像和后期图像处理的要求。

2.3.2 远、近光场耦合光学系统实验仿真

近场仿真成像放大率 $M_0 = 0.16506$, CMOS 单位像素大小为 $a = b = 1.4 \mu\text{m}/\text{pixel}$,因此近场平移漂移与成像亮圆图案中心坐标相对移动的关系为

$$\Delta B = k_0 \cdot \Delta N, \quad (1)$$

式中: ΔN 为入射光近场变化 (μm); ΔB 为相应的近场成像像素坐标变化 (pixel); $k_0 = M_0/a = 0.1179 \text{ pixel}/\mu\text{m}$ 。即近场图案中心的像素坐标单个像素变化对应的近场平移量为 $1/k_0 = 8.482 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。

因远场光路存在鬼像结构,利用仿真焦距求解远场测量分辨率不完善。实际装配完成后的焦距难以精确测量,且检测方案和实验环境也会给精密准直系统的测量带来干扰,因而仿真获得的远场测量精度具有较低的参考性。因此,该系统的远场准直精度直接由实验获得。

3 远、近光场耦合实验

3.1 光学系统测试方案与实验装置

实验以验证光学系统可行性为目的,测量了远、近场检测灵敏度,并结合理论仿真,对系统的可行性及影响因素展开分析。在近场实验中,使用相关算法作为图像识别算法,即对比平移前后两幅图案,通过移动和匹配获得图像平移的像素量,识别精度为 1 pixel。在远场实验中,直接测量提取图像中最亮点(远场会聚点的中心)坐标的移动量,精度为 1 pixel。

准直系统的精度由环境、设计、加工与装配、成像和算法等多部分构成,其中高精度算法直接影响准直精度量级。本文主要研究光学系统的可行性,因而实验未涉及复杂的图像算法,获得的远、近光场测量结论均为成像对光场变化的灵敏度,而非系统的准直精度。

实验光路如图 4 所示,1053 nm 激光束经扩束镜扩束为直径 30 mm 的平行光束,经平面反射镜入射光学系统,成像于探测器 CMOS 上,其中参考物应位于近场光路的物面。光学系统被装配至精密机械结构中,传感器和反射镜均装载在精密机械调整架上。平行光经实验装置的成像图如图 5 所示。

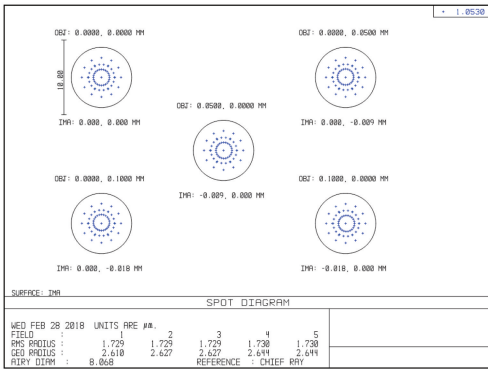


图 2 完整近场光路的点列图

Fig. 2 Spot diagram of the near-field imaging system

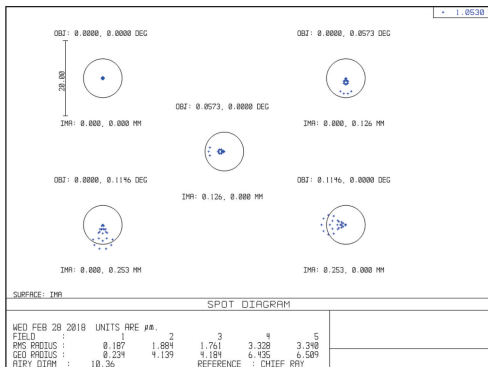


图 3 完整远场光路的点列图

Fig. 3 Spot diagram of the far-field imaging system

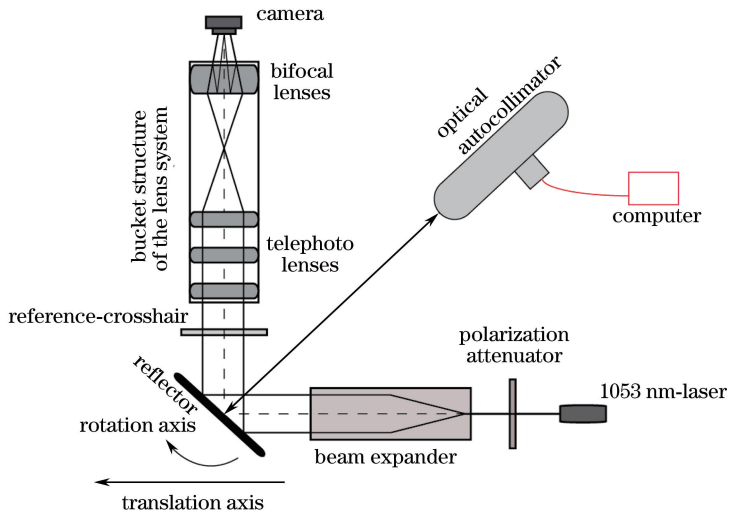


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Experimental system

以反射镜沿扩束镜光轴方向的平移作为入射平行光的近场平移,以反射镜绕垂直纸面轴线的旋转作为入射平行光的远场指向漂移,对反射镜的姿态控制和扰动能使入射光场发生相应变化。其中调节近场的平移台精度为 0.01 mm。普通机械转台刻度精度难以满足远场的微弧度级精度要求,因而需使用高精度自准直仪监测反射镜,获得指向变化。自准直仪测量精度为 0.2",则远场变化精度为自准直仪测量精度的两倍,即 0.4"。平移和旋转均沿单一轴改变,因此对于后续实验中获得的对应成像的移动,也只考虑对应的单一轴向上的移动量,即对于成像的移动只计算了图像水平轴方向的移动量。通过入射光在像面的近场和远场成像图案的中心像素坐标变化和对应的实际反射镜的姿态变化,即可得到实际准直灵敏度。

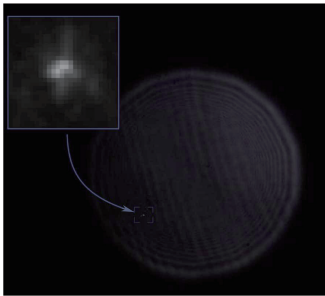


图 5 平行光经实验装置的成像图

Fig. 5 Imaging picture of the incident parallel light through the experimental system

3.2 近场验证实验

为获得近场测量灵敏度,实验前预先使用分辨率板标定近场成像分辨率,分辨率板图纸及成像图案如

图 6(a)、(b)所示。可知,近场成像分辨率可达 10 μm。

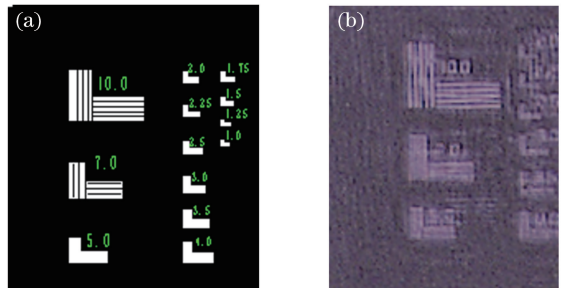


图 6 分辨率板标定近场光路成像分辨率。(a)分辨率板的工程图纸(局部);(b)分辨率板的成像图案(局部)

Fig. 6 Calibration of the near-field imaging resolution by using the resolution plate. (a) Engineering drawing of the resolution plate (part); (b) image of the resolution plate (part)

调节反射镜平移量,并对近场光路进行成像,采集图像后计算近场图案中心平移像素量。以实际反射镜平移量为横坐标,成像图案中心平移像素量为纵坐标作图,如图 7 所示。

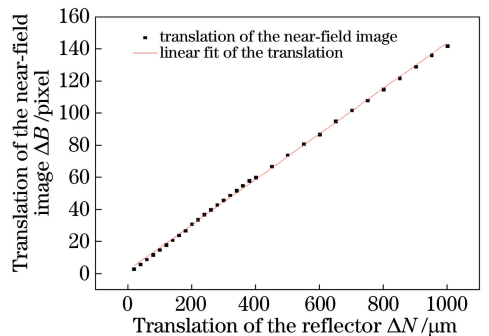


图 7 近场实验数据

Fig. 7 Near-field experimental data

对数据进行一阶线性拟合,得到拟合方程如下:

$$\Delta B = k_1 \cdot \Delta N, \quad (2)$$

式中: $k_1 = 0.142 \text{ pixel}/\mu\text{m}$ 。图像单像素对应近场平移量为 $1/k_1 = 7.04 \mu\text{m}/\text{pixel}$,即近场平移分辨率优于 $10 \mu\text{m}$,与仿真获得的近场测量灵敏度 ($8.482 \mu\text{m}/\text{pixel}$)吻合。由拟合方程获得的实验成像放大率约为 $M = k_1 \times a = 0.1988$,与仿真下近场成像放大率 ($M_0 = 0.16506$)相符合。

3.3 远场验证实验

扰动反射镜,读取自准直仪示数,识别对应图像的远场会聚点坐标,以自准直仪测量的反射镜转动变化量为横坐标,成像图案远场中心平移像素量为纵坐标作图,如图 8 所示。

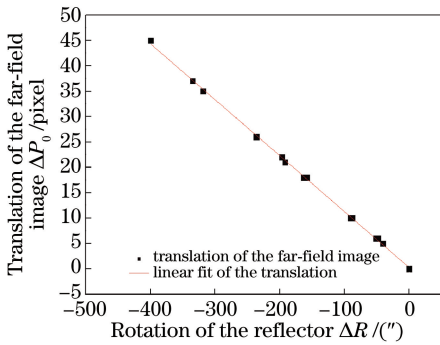


图 8 远场实验数据

Fig. 8 Far-field experimental data

反射镜转动 $10''$ (此时入射平行光的偏转角为 $20''$)对应像素移动量约为 1 pixel 。对数据进行一阶线性拟合,得到拟合方程如下:

$$\Delta P_0 = -0.11021 \cdot \Delta R, \quad (3)$$

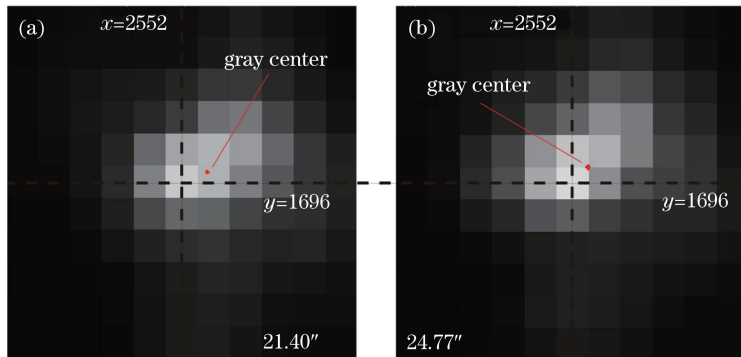


图 9 远场移动为 $21.40''$ 和 $24.77''$ 时远场会聚点成像图案。(a) $21.40''$ 时远场会聚点;(b) $24.77''$ 时远场会聚点

Fig. 9 Images of the pointing with the far-field shifting about $21.40''$ and $24.77''$.

Images of the pointing (a) at $21.40''$ and (b) at $24.77''$

3.4 远、近光场准直策略

当近场发生平移改变且不存在成像遮挡时,不考虑装置在这过程中受到指向上的扰动,远场会聚

式中: ΔR 为反射镜旋转角($''$); ΔP_0 为测量获得的远场成像像素坐标变化(pixel)。即远场准直方程为

$$\Delta P = -0.05511 \cdot \Delta F, \quad (4)$$

式中: ΔF 为入射光远场变化($''$); ΔP 为相应的实际远场成像像素坐标变化(pixel)。此时单位像素对应的入射光的远场指向移动为 $1/0.05511 = 18.14 (''/\text{pixel})$ 。

当使用亚像素算法进行处理时,能获得更高的远场指向测量灵敏度。在自准直仪示数为 $21.40''$ 和 $24.77''$ 时,远场光斑成像如图 9 所示,图中横、纵向虚线交点的像素点坐标均为 $(2552, 1696)$ 。虽然该点在两幅图中均为灰度最大点,但灰度重心和灰度轮廓均有明显的平移特征。两远场的灰度重心坐标已在图 9 中标出,可见图中 $2 \times (24.77'' - 21.40'') = 6.74''$ 角度变化引起远场灰度重心移动 0.3048 pixel 。若使用更复杂的、识别小尺寸光斑中心的亚像素算法,可确保算法精度和准确性,远场成像完全可以识别图 9 中的远场变化。在已发表的文献中,对小尺寸光斑中心的测量算法精度已达到 $0.1 \sim 0.05 \text{ pixel}$ ^[13-15]。使用此类精度的亚像素算法,可获得远场指向优于 $2''$ 的准直精度。该远场准直精度勉强高于设计需求(光束的指向稳定性优于 $2.1''$),但还不足以保证应用于装置时的准直稳定性。与传统准直系统的远场光路不同,该系统需要同时对远、近场进行成像测量,无法通过单独添加或改变光学元件来提高远场准直灵敏度,因而该光学系统远场准直部分后续需要进一步优化,提高灵敏度,以满足工程要求。

点应不移动。但实际中,近场调节时会随机给远场带入一定的偏转扰动。该扰动也具有随机性,这取决于近场调节装置和机械结构,且需通过多次反复

地远、近光场对准操作来去除。

当远场发生改变时,光束的近场会产生相对很大的平移量。平移量与角度变化和光束传输距离相关。当角度极其微小时,平移量近似与角度变化和传输距离成正比。利用获得的关系表达式,可以在一次成像测量后获得实际近场和远场对准所需要的调节量,直接补偿了远、近光场相互影响造成的成像坐标移动量,入射光能获得更快、更准确的校正,并避免在准直过程中因远场偏转过大而丢失近场图案。本节实验主要研究远场变化对近场的影响,预期获得需要的拟合函数,作为光束校准策略。

转动反射镜使远场指向改变时,近场变化如图 10 所示。

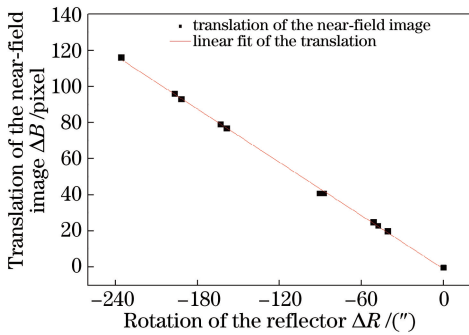


图 10 远场变化对近场成像的影响

Fig. 10 Relationship between the near-field image and the far-field shifting

对数据进行一阶线性拟合,得到拟合关系式:

$$\Delta B = -0.49039 \cdot \Delta R. \quad (5)$$

当调节远场指向角度时,对光场的近场姿态同时进行相应的平移,可加快对光束的准直过程,并避免近场成像因远场大幅度指向调节而超出成像范围。

3.5 光学系统误差的理论分析

高精度准直过程中的误差主要来源于环境气流角漂、实验平台稳定性准直误差、机械加工和安装的精度误差、光学系统成像像差对图像识别算法以及反馈控制的影响等。环境气流、实验平台和机械结构的稳定性准直误差幅度和作用方向是随时间快速变化的。这样的误差难以通过静态补偿的方式修正,需通过改善实验环境和装置稳定性进行优化。光学器件加工和安装产生的精度误差幅度和作用方向通常是恒定的,不需要考虑时间因素对误差的影响,可通过静态补偿的方式进行修正。

本研究以设计和验证光场耦合准直光学方案的应用可行性为目的,对光学系统的设计、加工和安装

的精度误差进行光学仿真分析。在加工和安装误差等影响下,误差来源主要是成像像差对识别算法的精度影响,以及反射结构偏心对远场会聚落点的影响。

光学元件装配时,测距器件精度为 0.01 mm,偏心度测量精度为 6",结合透镜的加工误差,使用 ZEMAX 进行误差分析。远场光路理想成像仿真下的光斑方均根直径约为 2 μm ,因衍射限制,最后成像直径约为 10.36 μm 。远场误差分析下获得的弥散斑方均根直径为 14.6 μm ,略大于艾里斑半径,成像光斑略微大于理想光斑。实验中获得远场会聚光斑如图 5 所示,成像大小约为 10 pixel \times 10 pixel,即 14 $\mu\text{m}\times$ 14 μm 左右,和误差分析下的成像大小相符,且该成像的像素大小更适合亚像素算法对中心坐标的提取,不影响远场测量精度。由偏心引起的会聚光斑的离轴量相对于装配好的光学结构是固定不变的,这将会在远场测量上添加一个指向偏移常量,不影响远场的测量精度。近场光路在误差分析下仿真获得的后焦距变化约为 0.1 mm,将略微改变近场的成像放大率。因焦距改变,近场成像在理论像面处将出现轻微模糊,可通过调节物面(参考物)的轴向位置使成像清晰。实验中近场成像放大率为 $M=0.1988$,与理想仿真下近场成像放大率($M_0=0.16506$)相符,近场测量灵敏度满足要求,即光学系统在考虑加工与安装误差后的仿真更接近实验成像,且在实际应用中光学系统高精度的加工和安装误差不会对该系统的远、近场检测灵敏性造成大的影响。

4 结 论

采用二阶鬼像成像的远、近光场耦合方案,设计并搭建出由三片式望远结构和利用二阶鬼像的非球面双焦透镜构成的准直光学系统。提出并实现了验证方案,获得的实际近场测量灵敏度为 7.04 $\mu\text{m}/\text{pixel}$,实际远场测量灵敏度为 18.14 (")/pixel(使用小尺寸光斑中心的亚像素算法,可获得远场指向精度优于 2")。对准直系统误差进行理论分析,结合仿真和实验结果分析光学系统的加工和安装误差,在优化占用空间的前提下,仍能获得高的准直灵敏度。对近、远场的相互关联影响进行了实验和分析,由此优化了光束准直策略。本文提出的远、近光场同光路耦合的准直方案,为后续高功率激光装置设备的改造提供了可选途径。

参 考 文 献

- [1] Li H, Wang D F, Zou W, *et al.* Design of high power laser beam automatic alignment system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(10): 1002003.
李红, 王东方, 邹伟, 等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计 [J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002003.
- [2] Li H, Zhu J Q, Lin Q, *et al.* Laser beam fast automatic alignment system for high power laser facility [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(10): 1014002.
李红, 朱健强, 林强, 等. 高功率激光装置快速自动准直系统 [J]. 光子学报, 2017, 46(10): 1014002.
- [3] Leach R R, Awwal A, Bliss E, *et al.* Analysis of the confluence of three patterns using the Centering and Pointing System (CAPS) images for the Advanced Radiographic Capability (ARC) at the National Ignition Facility [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9216(18): 3571-3575.
- [4] Roberts R S, Awwal A A S, Bliss E S, *et al.* Automated alignment of the Advanced Radiographic Capability (ARC) target area at the National Ignition Facility [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9585: 959814.
- [5] Rushford M C. Laser beam centering and pointing system: US8934097 [P/OL]. 2015-01-13 [2017-12-25]. <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetacgi%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=8934097.PN.&OS=PN/8934097&RS=PN/8934097>.
- [6] Liu D Z, Zhu J Q, Xu R F, *et al.* Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 582-586.
刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4程放大光路自动准直系统研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 582-586.
- [7] Xu R H, He J H, Wang W, *et al.* Automatic alignment algorithm of high-power laser beam [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 0214002.
许瑞华, 何俊华, 王伟, 等. 高功率激光光束的自准直算法 [J]. 光子学报, 2015, 44(2): 0214002.
- [8] Qin H T, Liu D Z, Ouyang X P, *et al.* Rapid laser beam auto-alignment in stereoscopic space for petawatt picosecond measurement systems [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502006.
秦海棠, 刘代中, 欧阳小平, 等. 拍瓦装置皮秒测量系统立体空间激光光路的快速自动准直 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502006.
- [9] Shen W M, Wu Q Y, Xue M Q. Optical design of far field beam diagnosis system in Shen-Guang III intense laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8): 964-969.
沈为民, 吴泉英, 薛鸣球. 神光III强激光光束远场诊断系统光学设计 [J]. 光子学报, 2004, 33(8): 964-969.
- [10] Cao H B, Lu X Q, Fan D Y. Ghost analysis for complex optical systems based on ZEMAX [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5): 1236-1239.
曹华保, 卢兴强, 范滇元. 用 ZEMAX 完成复杂光学系统的鬼像分析 [J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1236-1239.
- [11] Mei C, Zhou S Z, Zhang H J, *et al.* Method of first-order ghost-image analysis in imaging system based on Code V and Tracepro [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0411003.
梅超, 周泗忠, 张恒金, 等. 基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶鬼像分析方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0411003.
- [11] Mei C, Zhou S Z, Zhang H J, *et al.* Method of first-order ghost-image analysis in imaging system based on code V and Tracepro [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0411003.
梅超, 周泗忠, 张恒金, 等. 基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶鬼像分析方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0411003.
- [12] Feng G Y, Chen J G, Ma Z R, *et al.* Locating the near axial ghosts in the high power laser system [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 632-635.
冯国英, 陈建国, 马再如, 等. 高功率激光系统中近轴鬼像点的寻找 [J]. 光学学报, 2003, 23(5): 632-635.
- [13] Zhao J X, Zhou F Q. High-precision center location algorithm of small-scale focal spot [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8): 2690-2693.
赵婧鑫, 周富强. 小尺寸光斑中心的高精度定位算法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2690-2693.
- [14] Sun L H, Zhao X Y, Gao L Y, *et al.* Measurement of laser spot center position based on sub pixel positioning technology [J]. Laser Technology, 2017, 41(4): 511-514.
孙立环, 赵霄洋, 高凌好, 等. 基于亚像素定位技术的激光光斑中心位置测量 [J]. 激光技术, 2017, 41(4): 511-514.
- [15] Chen Y J, Feng Y, Wei L A, *et al.* Experiment research on subpixel location error of the facula centroid [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(2): 80-84.
陈运锦, 冯莹, 魏立安, 等. 光斑质心亚像素定位误差的实验研究 [J]. 光电工程, 2010, 37(2): 80-84.