

文章编号: 1001-4322(2003)03-0245-04

# 激光远场焦斑测试技术的实验研究\*

何 凌, 陈 波, 刘 华, 谢旭东, 夏彦文, 苏春燕, 卢宗贵

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 实验研究了激光远场焦斑能量分布测试的三种方法(长焦距透镜法、列阵相机法、Rattle Pair 法),对三种测试方法得到的实验数据进行了比对,系统地分析了每种方法的优缺点。结果表明,采用长焦距透镜与一对微楔角劈板组合测试激光远场焦斑的方法更具优势,可减少测试系统引入的像差,并使图像处理过程得到简化。

**关键词:** 远场测量; 列阵相机; Rattle Pair

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A

激光远场焦斑的能量分布是描述大型激光装置输出激光束质量的重要参数之一,也是惯性约束聚变(ICF)实验中表征激光束进洞能力的主要参数。激光远场分布测量也一直是激光驱动器参数测量中的一大难点<sup>[1]</sup>,主要存在两方面的困难:一方面是由于波面畸变具有不确定性,使得焦平面位置不易确定;另一方面是焦斑“主瓣”和“旁瓣”光能密度相差悬殊,无如此大动态范围的探测器。在国内的大型激光装置中,焦斑远场分布测量主要是采用长焦距透镜法和列阵相机法(神光 采用长焦距透镜成像放大测试,星光 采用列阵相机测试)。在美国 Beamlet 装置上,采用 Rattle pair 的方法进行远场焦斑的测量,其原理与列阵劈板的原理相似,使用面阵 CCD 作为记录介质<sup>[2]</sup>。本文针对现有激光远场测试的三种常用方法进行了实验研究,比较其测试技术的优缺点,讨论了数据处理的结果,提出了激光远场测试的技术方案。

## 1 激光远场焦斑测试(三种方法)的实验研究

### 1.1 实验平台简介

为对比三种激光远场测试技术的优缺点,建立了一个实验平台。它要求具有较大口径及较好近场分布的激光束输出,使三种激光远场测试仪器在相同的测试条件下对激光束的相同位置进行测试,以减少比对误差。实验采用 YAG 激光器(激光波长为  $1.06\mu\text{m}$ 、光束口径为  $\phi 6\text{mm}$ 、能量约为  $100\text{mJ}$ ) ,输出激光首先经过聚焦透镜,在焦点处放置一个  $\phi 200\mu\text{m}$  的衍射小孔,然后由准直透镜变为平行光。通过改变准直透镜的焦距获得不同口径的光束,此次实验采用  $\phi 70\text{mm}$  的光束,光路排布如图 1 所示。

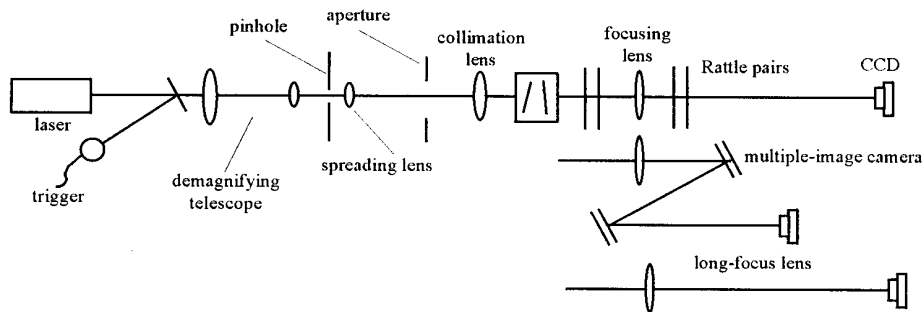


Fig. 1 Beam path alignment of far-field measurement

图 1 远场测量光路排布

### 1.2 长焦距透镜成像放大法<sup>[3]</sup>

长焦距透镜法是利用长焦距透镜( $f = 1800\text{mm}$ )对激光束进行聚焦,在焦点处放置不同口径的光阑小孔(一般为  $200 \sim 400\mu\text{m}$ ),它完成焦面判断及成像标定功能,在小孔后再放置一成像放大透镜(对焦斑进行 10 倍

\* 收稿日期:2002-09-16; 修订日期:2002-12-25

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题

作者简介:何 凌(1977-),女,研究实习员,从事激光参数精密诊断研究工作;绵阳 919-988 信箱;E-mail:linglingh505@sohu.com.

放大)。图 2 是采用此法获取的远场焦斑图像。

强激光的主瓣和边缘的旁瓣部分能量密度之比可达几个数量级,超出了 CCD 记录介质的动态范围,因此采用此法测试的激光焦斑图像实际上是强激光焦斑的主瓣分布,而旁瓣的信息被掩盖了。故激光束经衰减器后在 CCD 的线性动态范围内记录的信息只能反映激光焦斑的主瓣,而难以记录激光远场能量密度分布的完整信息,这是使用该法的缺点。



Fig. 2 Focal spot of far-field image

图 2 远场焦斑图像

### 1.3 列阵相机测试法

为扩大测量系统的动态范围,列阵相机利用了尖劈原理。经尖劈的多次反射,焦斑上的光强逐次衰减,在 CCD 接收面上形成一系列纵横有序的光斑,即列阵图。一行或一行内的各个光斑强度经过等比例分割,直径相继减小;通过机械调整,可以使一行(或一列)的所有斑点在聚焦透镜的焦深范围内,即此行(或此列)表达了激光远场在焦平面上的分布信息。每个光斑都分层次地反映了远场焦斑中一部分区域的能量分布情况<sup>[4]</sup>。根据劈板的分割比例和记录介质的线性动态范围可从列阵图中重构激光焦斑的远场分布<sup>[5]</sup>。受记录介质线性动态范围的限制,列阵图仍然不能完全反映激光远场焦斑的旁瓣信息,但与长焦距透镜法相比,已大大地扩展了系统测试的线性动态范围,能够较完整地记录激光远场能量分布的信息。

由于列阵相机采用离轴反射式机械结构,虽然给系统的调整带来方便,但引入的像差较大。其次,记录介质即 CCD 的分辨力有限,在计算列阵图的焦斑直径时引入一定的相对误差,从而影响系统的测试精度。这是列阵相机测试方法的主要缺点。

它的主要优点是:通过焦斑重构(嵌套)算法软件可以较完整地给出激光远场焦斑的空间分布(焦斑顶部的调制度);在一定范围内提高了测试系统的线性动态范围,能较真实地反映激光远场焦斑分布;若系统的聚焦透镜和激光装置打靶聚焦透镜能按比例(相似)地设计,则可以间接地反映 ICF 实验所需的激光靶点的空间分布;可以较直接地反映(上一发激光)激光束受放大器等热效应因素引起的波面畸变(波面畸变会引起激光束发射角的变化),因而可以通过测试结果,对下一发激光的波面进行修正。

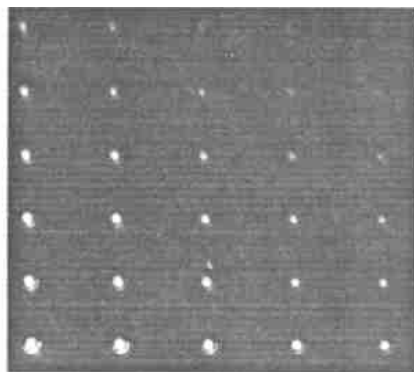


Fig. 3 Multiple-image camera image

图 3 列阵相机焦斑列阵图

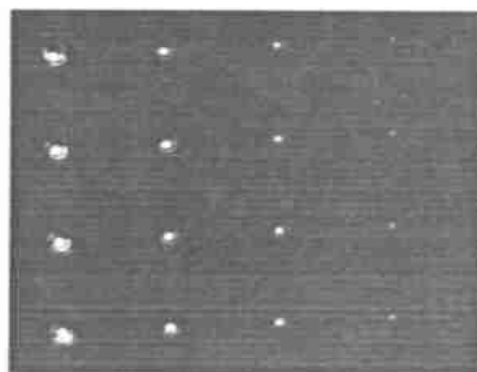


Fig. 4 Rattle Pair image

图 4 Rattle Pair 焦斑列阵图

### 1.4 Rattle Pair 测试法

Rattle Pair 法与列阵相机法相似,所不同的是它采用同轴光路。这样减少了系统的离轴像差,而且它的第一对尖劈是放置在聚焦透镜之前(分割的是平行光束),减少了系统经聚焦透镜后引起的焦斑畸变。这是它较列阵相机法最突出的优点。但系统的调试较困难,两对尖劈分割光束的比例不同,给焦斑的重构增加了一定的难度。而且分割焦斑强度的比例较大(56.8%及 89.6%),一行或一列的焦斑点数过多,在 CCD 芯片有限的记录空间范围内很难完整地记录焦面列(行)的所有信息,实际上降低了系统的测试动态范围,这是它的主要缺点。

## 2 三种方案的对比结果及讨论

采用图 1 的光路实验,直接使用面阵 CCD 获取列阵相机或 Rattle Pair 形成的光斑列阵。考虑到 CCD 具

有一定的线性动态范围,从焦斑中提取处于 CCD 线性动态范围内的数据,利用多次嵌套并通过一定的算法重构焦斑,可以不失真或较小失真地得到焦斑的能量分布及焦斑直径<sup>[5]</sup>。

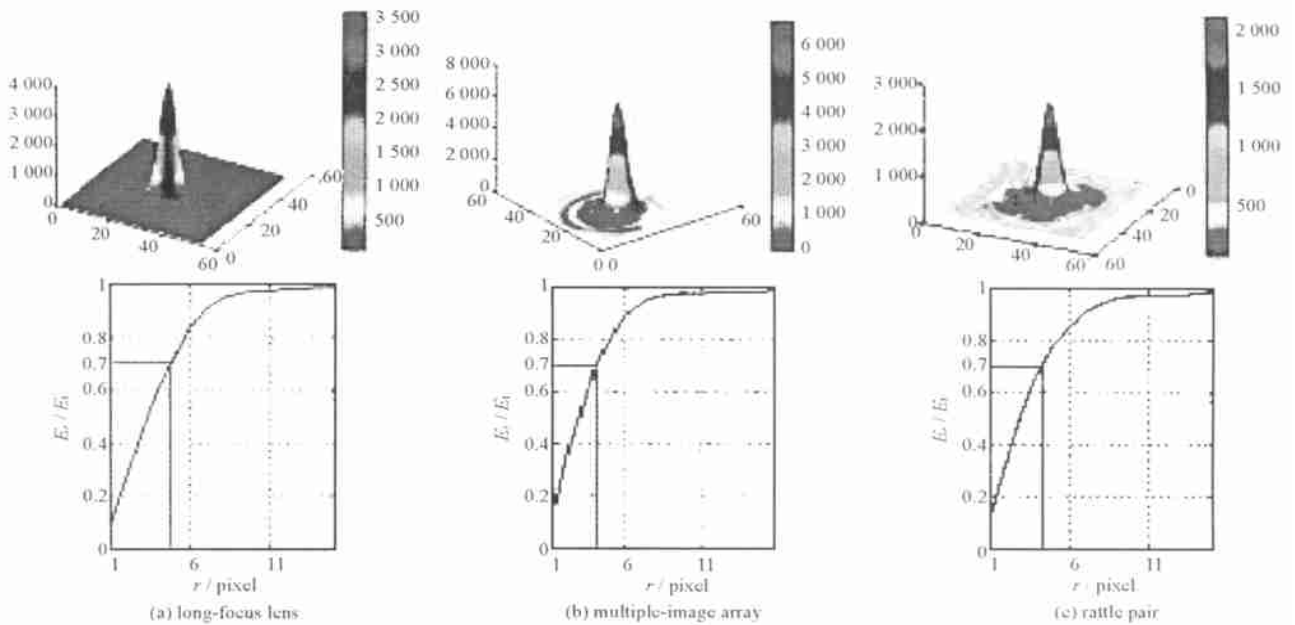


Fig. 5 View of experimental result

图 5 焦斑图像的数据处理及比对

图 5 给出了三种远场测量方法的数据处理结果,图中上面一行是重构焦斑图,下面一行是数据处理后得出的焦斑能量分布曲线。为了与激光器件系统设计指标中的光束发散角定义一致<sup>[2]</sup>,当半径为  $r_n$  的焦斑内占有的光能  $E_r$  达到该焦斑总光能  $E_t$  的 70% 时,称此  $r_n$  为激光焦斑半径。在能量分布曲线图中,纵坐标为焦斑内光能与总光能之比  $E_r/E_t$ ,横坐标为焦斑半径(以 CCD 最小接收单元像素为单位),图中的直线标注为  $E_r/E_t = 70\%$  时对应的焦斑半径。

长焦距透镜法测量激光远场所得结果示于图 5(a),其主要特点在于像差小,易准直<sup>[3]</sup>。在此实验平台中,通过采取小孔衍射、扩束、放置光阑等措施获取能量分布较均匀的被测激光束,其大部分旁瓣信息被光阑屏除,中心和边缘部分的能量密度相差不超过一个数量级,考虑到长焦距透镜直接成像的像差相对最小,所以,可以用其结果作为基准。

图 5 的(b),(c) 两幅图分别是列阵相机和 Rattle Pair 测得结果。由重构图中的焦斑形状和焦斑能量分布曲线可以看出,三种测试方法结果吻合。后两种远场测量方法的优点体现在测量中心和边缘部分能量密度相差极大的焦斑时,可以通过空气尖劈分割焦斑,能解决 CCD 饱和溢出的问题,扩大了系统的纪录动态范围,可以更完整、更真实的记录焦斑能量密度的分布情况,弥补了长焦距透镜法的不足之处。缺点在于采用了较多的光学组件,引入的像差比长焦距透镜的测量结果要大。在分割焦斑的同时也降低了焦斑光强分布空间分辨率,而且在实验中必须严格使焦斑阵列图像范围与成像透镜的视场相匹配。

在远场测量实验中,像差是十分重要的一个误差因素,引入像差的原因主要有两个方面:一是模拟光束并非严格平行光,通过尖劈分割焦斑后在接收面上产生一定的像差,且劈板本身也不可避免地产生像差;二是光束的焦斑阵列阵为离轴成像,亦会引入像差。另外,例如镀膜、面形精度等组件加工精度方面也会引入一定的像差。在实验中发现无论是列阵相机还是 Rattle Pair,采用两对劈板和一对劈板,结果有一定区别。劈板对形成的尖劈楔角越大(尤其是找焦面的劈板对),引起的像差也越大,由图 6 中的两幅近场图像的对比可说明这种情况。

实际测量中还发现,透镜的焦深足够大,可利用此优点,略去找焦面列这一步,即减少一对楔角较大的劈板,再综合减少像差等因素,拟采用一对带微楔角的劈板和长焦透镜系统进行远场成像测量。这样既能减小系统的像差,又能保证图像处理的简化,同时也满足测量精度的要求。图 7 即为一对劈板加一个长焦距透镜所得远场焦斑图像以及数据处理后所得到的焦斑重构图。

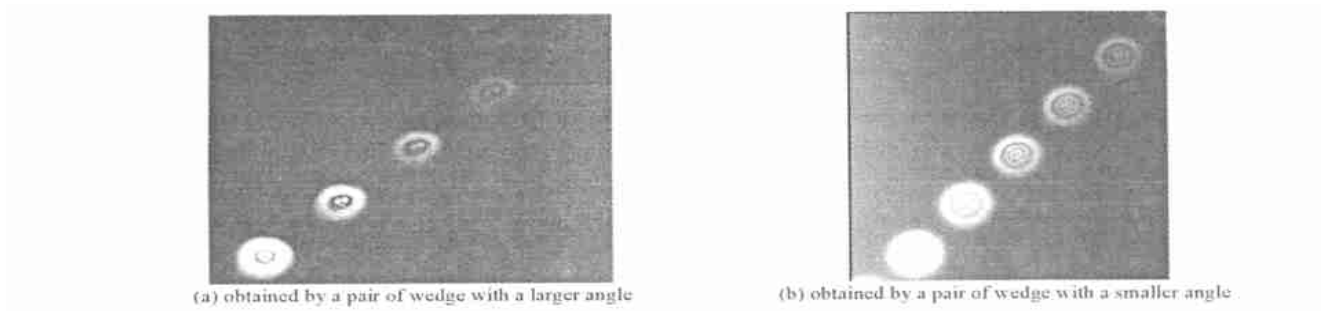


Fig. 6 Near-field image

图 6 两幅近场图

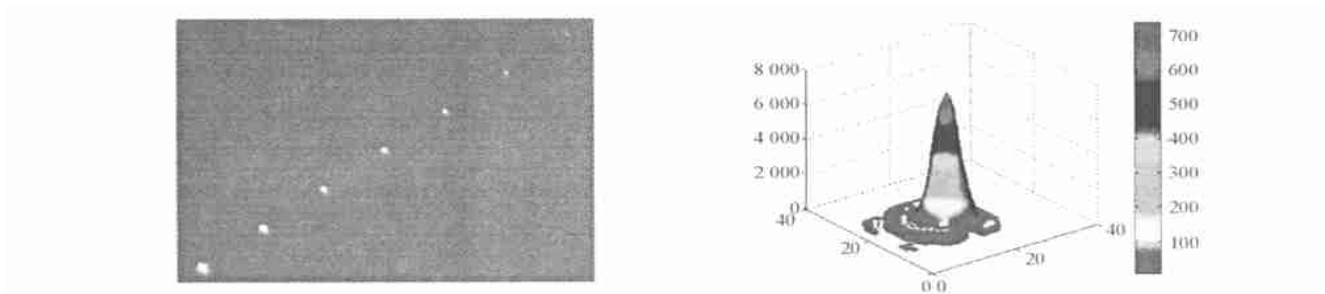


Fig. 7 Image obtained by a pair of wedge and long-focus lens

图 7 一对劈板结合长焦距透镜测得的图像及重构焦斑

### 3 结 论

本次实验的目的是对强激光远场焦斑测量方法进行可行性研究,通过在同一实验平台上测量同一束激光,并以长焦距透镜直接成像结果为基准,对能扩大系统动态范围的基于尖劈原理的列阵相机、Rattle Pair 进行了焦斑比对分析,综合考虑各种因素,结果表明采用一对微楔角劈板结合长焦距透镜的系统比以上三种常用测量方法更具优势。在今后的实验工作中,还将继续完善和探索强激光远场的测量技术。

#### 参考文献:

- [1] Normand D, Ferray M, Lompre L A, et al. Focused laser intensity measurement at  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> and 1053nm[J]. *Opt Lett*, 1990, 15 (23): 1400—1402.
- [2] Laumann C W, Miller J L, Thompson C E, et al. ICF Quarterly Report[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-JC-106786, 1991.
- [3] 支婷婷, 黄奎喜, 林尊琪, 等. 激光远场 CCD 诊断仪[J]. 激光与光电子学进展, 1997, (4): 29—35. (Zhi T T, Huang K X, Lin Z Q, et al. Laser far field CCD diagnostic device. *Laser & Optoelectrics Progress*, 1997, (4): 29—35)
- [4] Wegner P J, Hennesian M A. Lawrence Livermore National Laboratory. CA, UCRL-JC-106786, 1991.
- [5] 谢旭东, 陈波, 刘华, 等. CCD 系统线性动态范围的标定[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(s1): 182—184. (Xie X D, Chen B, Liu H, et al. Calibration of linear dynamic range for CCD system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(s1): 182—184)

## Experimental investigation in far-field test technique for high power laser output

HE Ling, CHEN Bo, LIU Hua, XIA Yairwen, XIE Xir-dong, SU Chur-yan, LU Zong-gui  
(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In experiment, three systems were designed to measure the energy distribution of the laser beam in the far field. Under the same conditions, the far field of the laser beam was measured independently by three instruments: long focus lens, rattle pair and multiple-image cameras. After compare and analyze the results, a new system was put forward in which a long focus lens with a pair of small-angle wedge was used. It only needs corresponding data processing for a focal-spots line which was on the focal plane. The new system satisfied requirement for aberration and predigested image data processing.

**Key words:** Far-field measurement; Multiple-image camera; Rattle pair