

文章编号: 1001-4322(2003)03-0237-04

强激光远场焦斑重构算法研究*

谢旭东, 陈波, 何凌, 刘华, 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: 通过 CCD 图像采集单元结合传统的列阵相机测量高功率固体激光器的远场焦斑分布, 采用图像处理技术的边缘算子提取焦斑的几何中心, 提出通过几何中心对心的焦斑嵌套重构算法, 解决了光斑饱和时的对心难题, 实现了快捷准确测量激光焦斑, 为激光器的实时控制提供参考数据。

关键词: 激光焦斑; 嵌套; 边缘算子; CCD; 远场分布

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

激光远场分布是评价激光束质量的重要指标^[1]。特别是在强激光的 ICF 打靶应用中, 焦斑质量直接影响打靶效果。高功率固体激光器的激光焦斑强度分布具有极高的动态范围, 主旁瓣的强度差很大。列阵相机用于测量激光束远场角分布^[2], 其精度可达由光束口径所限定的衍射极限角, 并可根据测得的光束远场能量分布, 判断光束传输性能的优劣。所以比其他测量方法^[3]直观, 且包含的信息量多。但是采用胶片作为记录介质^[4], 胶片的显影条件影响测量结果, 可重复性差, 且列阵点不易读准, 复杂的后期处理不能实现实时测量^[5]。

如今科学级面阵 CCD 已经广泛用于激光的光束质量测量中。直接使用面阵 CCD 获取列阵相机产生的激光焦斑列阵图。利用 CCD 具有较高的线性动态范围, 从焦斑列中的各个光斑提取处于 CCD 的线性动态范围内的数据通过一定的算法重构焦斑。这种方法利用嵌套, 大大提高了焦斑的测量动态范围, 即可以不失真或较小失真地测量动态范围远大于 CCD 的动态范围的焦斑强度分布。CCD 获取的激光焦斑图像经过输出电路的量化处理可以直接送计算机作后继的计算, 极大简化了后期处理, 并可以在很短的时间内计算出焦斑的强度分布, 能够满足实时测量的要求。

1 激光远场焦斑测试原理分析

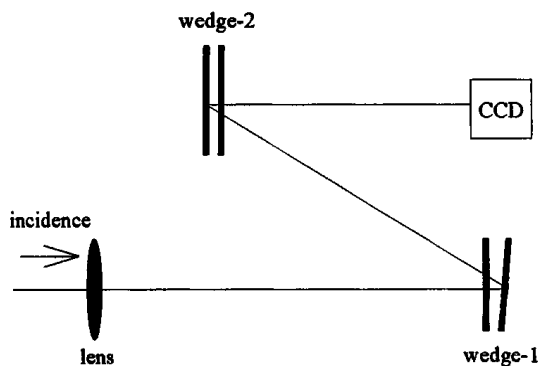


Fig. 1 Array camera optics arrangement
图 1 列阵相机光路排布

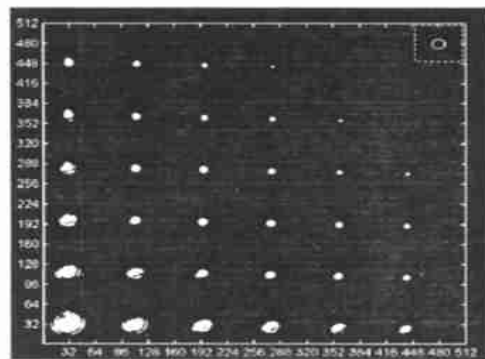


Fig. 2 Focal spot array acquired by CCD
图 2 用 CCD 获取的焦斑列阵图

图 1 为列阵相机光路排布。列阵相机主要由两部分组成: 长焦透镜和两对尖劈组。每对尖劈的第一面为透反面, 第二面为高反射面。两反射面之间有一定的劈角可以微调。入射激光通过长焦距透镜后被第一对尖劈多次反射, 在水平方向分裂形成一列子光束。该列子光束被第二对尖劈多次反射, 又在铅垂方向分裂形成一个子光束列阵。子光束列阵都成像于透镜的焦面附近形成激光焦斑列阵图^[2]。CCD 置于透镜的焦面获取激光焦斑列阵图, 如图 2。选出一列光斑, 利用该列各光斑之间的强度关系就可以重构原始的激光焦斑。

* 收稿日期: 2002-09-27; 修订日期: 2002-12-21

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 谢旭东(1976-), 男, 研究实习员, 主要从事强激光参数精密化诊断工作, 绵阳市 919-988 信箱。

为了确定焦面列中各个子光斑的强度关系,不妨设所选焦面列对应于第一对尖劈,它的两个反射面的反射率分别为 R_1, R_2 。各个子光斑的强度为 I_n ,则可以确定^[6]:

(1) 当第一反射面的第一个反射光斑参与重构时(其余光斑为透反光斑)

$$I_n = (1 - R_1)^2 R_2^{n-1} R_1^{n-3} I_1, \quad n = 2 \quad (1)$$

(2) 当第一反射面的第一个反射光斑不参与重构时

$$I_n = (R_1 R_2)^{n-2} I_2, \quad n = 3 \quad (2)$$

根据 CCD 的光电转换特性,CCD 某像元的电压输出与照射在该像元上的激光能量成一定比例关系。所以在 CCD 的线性响应范围内,CCD 的输出数据可以看成是对分布的真实反映。它们之间的二维分布形状应该是相同的,只是在比例上相差一个常数比例因子。CCD 的线性动态范围可以预先标定^[6]。CCD 的输出数据是经过 12bits 量化处理的数字数据。将 CCD 每个像元的量化输出值称为该像元接收到的光斑灰度值。只有光斑对应的灰度处于 CCD 的线性灰度范围内,该灰度值才是可用的。CCD 的线性灰度范围低于强激光焦斑分布的动态范围,提取焦面列中每一个光斑处于 CCD 线性灰度范围内的灰度值,然后根据式(1),式(2)确定的关系恢复激光焦斑,该过程就是嵌套。

2 焦斑重构——嵌套处理

CCD 面阵呈矩形排布,故它输出的二维数据可以用一个离散的二维变量 $E(x, y)$ 表示,其中 x, y 为离散整数值。设某一被选焦面列中有 N 个光斑,按由强到弱的次序分别编号为 $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_N$;每个光斑的灰度分别同样由离散二维变量表示为 $E_1(x_1, y_1), E_2(x_2, y_2), \dots, E_i(x_i, y_i), \dots, E_N(x_N, y_N)$, x_i, y_i 为整数。

2.1 光斑对心

从列阵图中获取各个光斑数据时,采用了交互式的人机界面方式。操作者通过软件界面指定各个待选光斑,计算机提取其数据。因此各个光斑数据建立在彼此独立的坐标系中。要作嵌套处理,首先就必须将这些彼此分离的坐标系平移到一个统一的坐标系中。列光斑是由同一原始焦斑经多次反射产生,所以它们存在一个共同的中心(质心或几何中心)。对心的过程就是以一定的判据找出它们的中心,然后利用坐标变换将它们从各自的坐标系平移到统一坐标系中。

对于第 i 个光斑 S_i ,其强度分布为 $E_i(x_i, y_i)$,此时坐标原点在数据阵列的左下角,亦即 S_i 在其坐标系的第一象限。 x_i, y_i 从 1 开始。

可以将光斑的强度分布看成它的面密度,则在二维平面上设第 i 个光斑 S_i 的质心为 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) ,则

$$\bar{x}_i = \frac{\iint_i E_i(x_i, y_i) dx_i dy_i}{\iint_i E_i(x_i, y_i) dx_i dy_i}, \quad \bar{y}_i = \frac{\iint_i E_i(x_i, y_i) dx_i dy_i}{\iint_i E_i(x_i, y_i) dx_i dy_i} \quad (3)$$

显然焦面列中既有饱和光斑又有非饱和光斑,饱和光斑是 CCD 对焦斑的失真响应,产生的原因是 CCD 的响应动态范围低于焦斑的强度动态范围。当失真的数据参与到质心的计算中,就会造成质心的失真,从而使对心不准,与此同时旁瓣也会影响对心精度。各个子光斑由同一母光斑分裂形成从而具有相似的空间分布,所以它们的几何中心是一一对应的。以各个光斑的几何中心为它们的新坐标系的原点,确定它们在新坐标系中对应的坐标。利用这种关系建立了各个独立光斑的统一坐标系实现对心。

$$x = x_i - \bar{x}_i, \quad y = y_i - \bar{y}_i \quad (4)$$

(x, y) 为第 i 个光斑 S_i 在统一坐标系中的坐标,它们的灰度分布就表示为 $E_1(x, y), E_2(x, y), \dots, E_i(x, y)$ 。

光斑的几何中心由边缘算子获取。首先使用边缘算子^[7]提取各个光斑的轮廓因子,然后利用该轮廓因子求出该光斑的几何中心 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 。光斑图像的边缘定义为其灰度分布变化最剧烈的像素区。而饱和数据是一个恒定值,故它不会影响图像边缘的提取,从而不会使计算出的光斑几何中心失真。可见,几何中心法比质心法好,本文采用几何中心对心法。

2.2 嵌套

激光焦斑的动态范围远远超过了 CCD 的测量动态范围,因此 CCD 获取的某个光斑图像不可能记录下激光焦斑的全部信息,但是每个光斑处在 CCD 线性灰度范围内的灰度值却准确的记录了焦斑不同强度范围的有用信息。设 CCD 的线性灰度上限为 T_h 。根据式(1),式(2),令

第一个光斑参与重构时
$$C_n = \begin{cases} 1, & n = 1 \\ (1 - R_1)^{-2} R_2^{1-n} R_1^{3-n}, & n = 2 \end{cases} \quad (5)$$

第一个光斑不参与重构时
$$C_n = (R_1 R_2)^{3-n}, \quad n = 3 \quad (6)$$

设与待嵌套的焦斑的能量分布相对应的灰度分布为 $E(x, y)$, 嵌套过程如下:首先设 $E(x, y) = E_1(x, y)$, 使用系数 C_n 将 $E_i(x, y)$ 灰度值还原为 $D(x, y) = C_i E_i(x, y)$, $i = 2 \sim n$, 用 $D(x, y)$ 中大于 $C_{(i-1)} T_h$ 的点去替换 $E(x, y)$ 中坐标相同点,这样一来就完成一次嵌套。重复前面的步骤直到某一个光斑的灰度值低于 $C_{(i-1)} T_h$ 为止。这样强光斑中的非线性值就被弱光斑中的线性值覆盖,最后得到的焦斑灰度分布 $E(x, y)$ 就消除了由 CCD 的线性动态范围不足造成的饱和失真等影响。经过这样的嵌套处理,就得到具有完整激光焦斑信息的灰度分布图像。有了完整的焦斑信息就可以继续其他重要参数的计算,如远场发散角,焦斑半径等。

3 结果及分析



Fig. 3 An arrange of focal spots quantified by 4096 levels of gray
图 3 具有 4096 级灰度的焦斑列(光斑灰度值为 0~4095)



Fig. 4 Edge profile quantified by two sets of discrete values 0 and 1, where edge exists is represented by 1, or otherwise represented by 0

图 4 用边缘算子提取的边缘因子,由 0,1 二值化表示(1 表示光斑该处有边缘(图中亮的部分),0 表示该处不存在边缘)

图 4 中心轮廓周围的零散轮廓是焦斑的旁瓣产生的,从图 4 中左边起前两个光斑的旁瓣未被衰减淹没,所以反映在图 4 中,而在图 3 灰度中灰度显示的分辨率有限,肉眼很难看出旁瓣。计算几何中心时只取内部的小环,所以它们的存在不影响计算。图 5 是重构焦斑的三维显示,从图中可以看出其最大灰度值已经超出了 CCD 的最大灰度值(4095),而且旁瓣也能很清楚地观察到,说明嵌套算法提高了 CCD 的测量动态范围。采用几何中心的对心方法解决了由光斑饱和和引起的对心不准的问题。采用 CCD 获取激光焦斑列阵图,极大地简化了数据处理过程,提高了测量效率。它可以为激光器的实时控制提供快捷的参考数据。采用嵌套算法,使得用具有较小动态范围的 CCD 测试设备就能完整地测量具有更大动态范围的激光焦斑强度分布,而且降低了对测试设备的要求,节约了成本。省去胶片曝光、冲洗的中间过程,有利于提高测量精度。

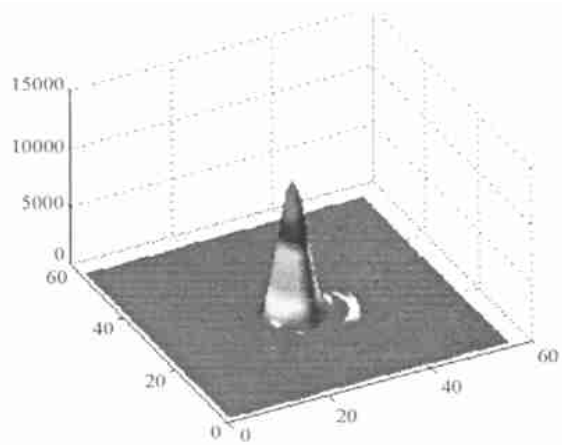


Fig. 5 3-D focal spot distribution
图 5 重构焦斑的三维显示

参考文献:

[1] International Organization for Standardization. Terminology and test methods[S]. ISO/ TC 172/ SC 9/ WG1 N80,1995.
 [2] 梁向春,蒋玉柱,施阿英. 高功率激光的光学特性测试[J]. 光学学报,1982,2(2):113—121. (Liang X C, Jiang Y Z, Shi A Y. Optical characteristics measurements of high power laser. Acta Optica Sinica, 1982,2(2):113—121)
 [3] 激光参数测量编写组. 激光参数测量[M]. 上海:上海人民出版社,1976. 23. (Compiling group for measurement of laser beam parameter, Mea-

- surement of laser beam parameter. Shanghai:Shanghai People Press, 1976. 23)
- [4] 何伟明,吕志伟,王骥. 紫外示波纸用于阵列相机测光束角分布[J]. 光学学报,1997,17(6):831—832. (He W M, Lu Z W, Wang Q. Ultraviolet-oscilloscope paper used in array camera to record the far-field of laser beam. *Acta Optica Sinica*, 1997,17(6):831—832)
- [5] 夏志坚,叶金祥. 激光焦斑微机分析系统[J]. 重庆大学学报,1992,15(1):94—99. (Xia Z J, Ye J X. Computer processing system for analysis of laser focal spot. *Journal of Chongqing University*, 1992, 15(1):94—99)
- [6] 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. Calibration of linear dynamic range for CCD system. *High Power Laser and Particle Beams*,2000,12(s1):182—184)
- [7] Image Processing Toolbook User 's Guide[M]. The MathWorks. 1999.

Algorithm research on focal spot reconstruction for high power laser output

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

Abstract: With the combination of CCD imaging unit and traditional multi-image camera to measure farfield distribution of laser output, the reconstruction algorithm for focal spot of high-power solid-state laser output was described. The geometric cores of these focal spots was abstracted to center these spots by virtue of edge computational kernel applied in the field of image processing, nesting algorithm for focal spot reconstruction is put forward. It can precisely center these spots even if they are saturated partially and instantly reconstruct original focal spot, which makes it feasible to provide real-time data for laser control.

Key words: Focal spot; Nesting algorithm; Edge computational kernel; CCD; Far-field distribution