

采用扫描式漫反射成像法的激光强度分布测量装置

王 飞,徐作冬,耿运峰,姜 畅

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024)

摘 要: 提出了一种基于扫描式漫反射成像法测量激光强度时空分布的装置。测量装置主要由轮辐式扫描取样机构、同步信号发生器和 CCD 成像系统组成。装置使用动态的取样旋臂替代静态的漫反射屏,在保留漫反射成像法优点的前提下用取样的方式进行测量,具有测量分辨率高、取样衰减倍率较大、抗激光破坏能力强以及可在线测量等优点。与漫反射屏成像法的比对测量实验表明:两种测量方法的测量结果具有较高的一致性。扫描式漫反射成像法实现了对光斑的在线测量,可用于强激光辐照效应实验中激光强度分布的实时监测。

关键词: 光斑测量; 成像法; 漫反射; 扫描法

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2219-04

Measurement system for laser intensity distribution based on scanning diffuse reflection imaging

Wang Fei, Xu Zuodong, Ji Yunfeng, Jiang Chang

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter of Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A measurement system based on scanning diffuse reflection imaging was developed for space-time distribution of laser intensity. The measurement system mainly consisted of spoke-shaped sampling structure, synchronous signal generator and CCD imaging system. Instead of the traditional static diffuse reflecting screen, sampling was realized with several spoke-shape dynamic rotating arms, which was feasible for online measurement of laser intensity distribution. Besides high resolution of the traditional method, there were more advantages in this scanning diffuse reflection imaging method, e.g. high laser attenuation ratio, strong power against laser destruction, simple structure and better maneuverability. Comparative experiments with the diffuse reflecting screen imaging method demonstrate high correspondency between the two methods. This system can be applied in the real-time monitor of laser intensity distribution in laser irradiation effect experiments.

Key words: laser spot measurement; imaging; diffuse reflection; scanning method

收稿日期:2013-11-18; 修订日期:2013-12-10

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室创新基金(SKL111102)

作者简介:王飞(1978-),男,助理研究员,硕士,主要从事激光参数测量方面的研究工作。Email: wf97@ustc.edu

0 引言

激光强度时空分布是指激光光斑强度空间分布随时间的变化,在激光光束质量诊断和激光大气传输测量等方面具有重要意义^[1-2]。在强激光辐照效应实验中,为满足激光束实时监测的要求,需要对激光强度的时空分布进行取样测量。主要的强激光取样技术有部分透射/反射式取样技术、高功率反射镜漫散射取样技术、小孔光栅取样技术和反射光栅取样技术等^[3],但均对光学元件的质量和实验环境提出了较高的要求,应用于外场实验时受到一定的限制。在强激光聚焦光斑强度分布的测量中,空心探针扫描法具有空间分辨力高、可测尺寸大及在线监测等优点,但在时间分辨上存在不足;而基于 CCD 成像法的漫反射屏取样测量具有实时性好、时空分辨力高和使用方便等优点^[4-5],却因其对激光束具有阻挡性而难以用于辐照效应实验中激光束的在线监测。综合漫反射屏取样和扫描法的优点,文中提出一种基于扫描式漫反射成像法的激光强度时空分布测量装置,可通过取样的方式对激光束进行实时监测,实现激光强度时空分布的高分辨力在线测量。

1 测量原理

如图 1 所示,取样旋臂扫描通过取样区域时,入射激光经取样旋臂发生漫反射,CCD 成像系统对取样区域成像,采集入射光散射光斑的灰度图像并输入计算机进行数据处理和光斑畸变校正,通过复原计算得到光斑强度的时空分布结果并再现光斑。

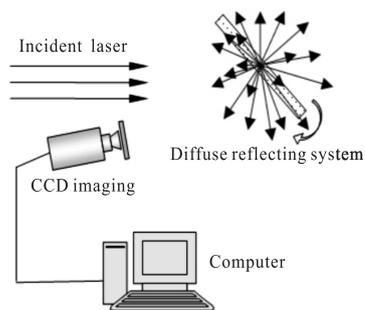


图 1 测量原理示意图

Fig.1 Sketch of measurement principle

扫描式漫反射成像法的特点在于使用动态的取样旋臂替代静态的漫反射屏,在保留漫反射成像法

优点的前提下用取样的方式实现在线测量。测量时,在 CCD 相机快门每一次开启的时间内,取样部件需完成对取样区域的一次完整扫描。为避免激光强度时空分布测量结果的失真,取样区域内各面元在同一次扫描中的取样时间应保持一致,同时,每一面元在各次扫描中的取样时间也应保持一致。在取样装置设计中,还需采取措施使各次扫描取样过程均能对取样区域完整扫描。

面元取样的一致性可通过取样部件的设计来实现。在旋转取样的方式下,对取样空间中不相关的任意两点,扇形结构的取样旋臂完成对这两点扫描转过的角度是相同的。若取样旋臂做匀速转动,则其转过相同角度所用的时间是一致的。因此,设计取样旋臂为匀速转动的扇形结构,可实现取样区域内各面元在测量中的取样一致性。

取样区域的完整扫描可通过设计同步触发来实现。为保证取样光斑的有效性和完整性,单次的取样过程应在两次同步触发信号的间隔内完成。取样过程的原理如图 2 所示。

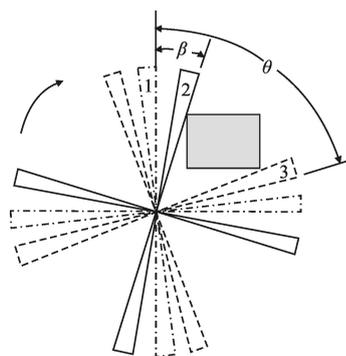


图 2 取样过程原理示意图

Fig.2 Sketch of sampling principle

图中的矩形框为取样区域,取样旋臂呈对称布置。为减小光斑图像的噪声,需减少快门曝光过程中的无效曝光时间。如图 2 所示,取样旋臂位于位置 1 的时候,同步触发器产生触发信号输入 CCD 相机,而在位置 2 时取样旋臂才进入取样区域,其间的时间若快门处于开启状态则会增加背景的曝光时间,从而引入一定量的噪声。因此,可在触发信号到达后设定一定的触发延迟时间来实现降噪的目的,取样旋臂从位置 1 到位置 2 转过 β 角时所对应的的时间即为可设置的最大触发延迟时间 $t_{d,max}$ 。取样旋臂在位

置2进入取样区域,完成取样后到达位置3,其间快门必须处于开启状态才能保证取样光斑的完整性。由此,以接收到触发信号为零时,CCD相机的快门曝光时间 t_e 的取值范围为:

$$t_e \subseteq \left[\frac{\theta}{2\pi f} - t_d, t_{\text{slot}} - t_d \right] \quad (1)$$

式中: f 为取样旋臂的转动频率; t_{slot} 为两次触发信号之间的时间间隔; t_d 为预先设置的触发延迟时间:

$$t_d < t_{d,\text{max}} = \frac{\beta}{2\pi f} \quad (2)$$

在装置的现场应用中,对确定的取样区域,可根据测量要求选取触发延迟时间和快门曝光时间的优化配置,降低因无效曝光引入的本底噪声,提高测量结果的精度。

2 测量装置介绍

测量装置由轮辐式扫描取样机构、同步信号发生器和CCD成像系统组成,其结构如图3所示。

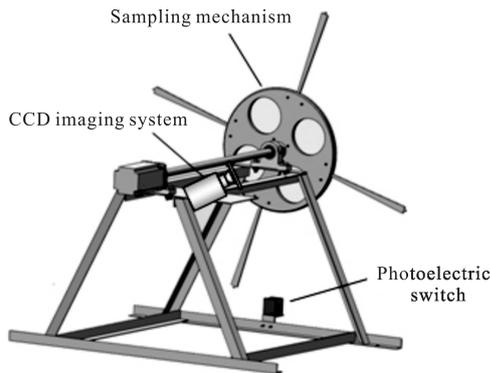


图3 装置结构示意图

Fig.3 Sketch of device configuration

2.1 轮辐式扫描取样机构

轮辐式扫描取样机构主要由取样旋臂、回转部件及配套支架构成。

取样旋臂设计为对称布置的四根直线型旋臂,其反射面为漫反射表面。旋臂的取样段为扇形结构,在其末端设计了一小段突起,用于同步触发信号的产生。取样旋臂运用盘片式夹具固定以提高其强度和安装精度。

回转部件用于驱动取样旋臂。电机转速设计为多档可调,可满足不同采样频率的测量需求。回转部件在选定的转速档位中匀速运行,从而保证取样区域内各点取样时长的一致性。

配套支架为各部分提供定位和支撑,并使测量装置成为一个整体。扫描取样机构的整体设计具有简化性和等比放大的可扩展性,可根据不同的现场应用需求设计不同大小的取样机构。

2.2 同步信号发生器

同步信号发生器用于为CCD数字相机提供稳定的触发信号,由光电开关和信号调理电路组成。

由于对称分布的取样旋臂在匀速转动的条件下,任意两条相邻旋臂到达回转半径内某固定点的时间间隔是一致的,因此测量装置在旋臂末端小段突起的运动路径上安放了一个槽式光电开关以产生同步触发所需的开关量信号。通过信号调理电路对该信号进行调压展宽,形成CCD数字相机所需的触发信号。

2.3 CCD成像系统

CCD成像系统包括CCD数字相机、镜头、衰减片及滤光片等组件,用于采集入射光散射光斑的灰度图像并对其进行畸变校正。

在CCD成像系统中,滤光片用于减小环境杂散光对测量结果的影响。由于强激光经漫反射后的光强仍比较大,需使用衰减片组对其进行进一步衰减。衰减片使用吸收型中性衰减片以避免衰减片之间的反射对成像的影响。衰减倍数需在镜头光圈锁定后根据入射光的强度来选择。

由于CCD成像系统测得的光斑通常存在一定的形状畸变和强度畸变^[6],因此在CCD数字相机和镜头选定后需进行标定,得到畸变校正参数,用于数据处理时光斑的还原计算。

2.4 测量装置优点

与传统的漫反射屏成像测量装置相比,扫描式漫反射成像法测量装置不仅具备在线测量的优点,还能提供更大的取样衰减倍率并具备更高的抗强激光辐照性能。

在图2的模型中,对取样区域的任一点,在快门曝光时间内,使用漫反射屏成像法测量时,该点处的漫反射光始终可见,而使用扫描法则只在旋臂扫描通过的时间内该点处的漫反射光可见。

设取样旋臂的扇形结构对应的圆心角为 γ ,若该点处的光强在测量过程中不变,则对于相同材质的反射面,相对于漫反射屏成像法,扫描法的取样衰减倍率为:

$$A \geq \frac{\gamma}{\theta - \beta} \quad (3)$$

从公式(3)可以看出,在取样区域确定的条件下,可通过取样旋臂宽度的设计来调节取样衰减倍率。

对于设定的快门曝光时间和激光持续时间,漫反射屏成像法测量时反射屏始终处于激光辐照状态,而扫描法测量时取样旋臂只在扫描通过取样区域时处于激光辐照状态。设激光持续时间为 t_0 ,则扫描法测量时取样旋臂接收激光辐照的时间为:

$$t_1 = \frac{\gamma}{2\pi} \times t_0 \quad (4)$$

从公式(4)可以看出: t_1 与取样频率无关,但与取样旋臂扇形结构的圆心角相关。由于扫描法中取样旋臂受激光辐照的时间短,单次取样后非工作时间长,甚至可以在取样区域外对其进行散热处理,故扫描取样机构的抗激光破坏阈值可得到较大的提高。

3 实验结果

选用喷砂铝板表面为漫反射面,分别用漫反射屏成像法和扫描法对实验激光进行测量,得到的光斑图像如图 4 所示。

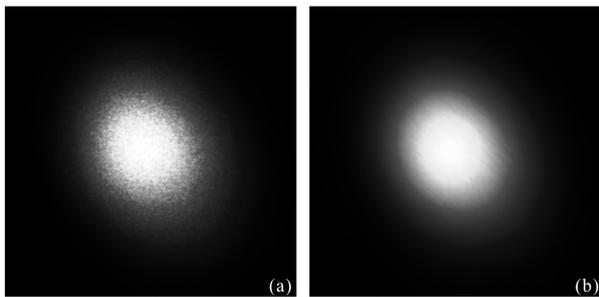


图 4 实验光斑图像

Fig.4 Spot images of experiment

图 4(a)为漫反射屏成像法测量所得的光斑图像,图 4(b)为扫描式漫反射成像法测量所得的光斑图像。可以看出,两种方法测量得到的光斑分布是一致的。通过对两种方法采集得到的光斑图像数据进行分析计算,二者测量得到的光斑直径之差小于 3%,质心位置之差小于光斑直径的 1%。经初步分析,数据的

差异主要来自于喷砂铝板表面反射率在小尺度内的空间不均匀性。由此可见,扫描式漫反射成像法在保留了成像法测量高时空分辨率优点的同时实现了对光斑的在线测量。

4 结论

通过扫描式漫反射成像法测量装置,可实现激光强度时空分布的在线测量。扫描式漫反射成像法具有成像法测量分辨力高的优点,避免了漫反射屏取样时阻挡光路的不足,而且具有比漫反射屏成像法更大的衰减倍率和更高的抗激光破坏阈值,可较好地应用于强激光辐照效应实验中激光束的实时监测。测量装置基于通用技术构建,对光学元器件及实验环境的要求不高,且具有良好的机动性,在强激光参数在线测量中具有重要作用。

参考文献:

- [1] Pang Miao, Yuan Xuewen, Gao Xueyan. Measurement system for laser intensity distribution based on diffused transmission imaging [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2010, 22 (12): 2839-2842. (in Chinese)
- [2] Gao Wei, Wang Yunping, Li Bin. Study on characterization and diagnosis of high power laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 61-64. (in Chinese)
- [3] Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 244-246. (in Chinese)
- [4] Zhang Yingxin, Wang Yunping, Wang Yu. Development and application of far-field laser spot measurement system based on CCD [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2011, 26 (4): 11-13. (in Chinese)
- [5] Ji Yunfeng, Xie Yongjie, Duan Liuhua, et al. Laser irradiating distribution measurement based on diffuse reflectance and calorimetry technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 86-88. (in Chinese)
- [6] Pang Miao, Yuan Xuewen, Gao Xueyan. Spot distortion calibration in the measurement of laser intensity distribution based on imaging by scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 451-455. (in Chinese)