固体激光远场瞬时光斑时空分布测量技术

李艳娜,唐力铁,谢翔云,尹 飞,于志闯,沈丽娟

(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

摘 要:基于漫透射 CCD 成像法原理,建立了固体激光瞬时光斑时空分布测量系统。开展了该测量方法的可行性验证实验,能够精确地获得激光远场光斑图像,并运用 Matlab 软件对测量数据进行处理,得到激光远场光斑半径、光束质量、质心位置、光轴抖动、光强分布以及平均功率密度等参数。实验结果表明:利用漫透射 CCD 成像法测量固体激光远场瞬时光斑时空分布是可行的,测试系统采集频率可达 120 Hz。该方法具有高分辨率、高帧频、低成本、使用方便的突出优点,能同时实现激光强度分布和功率的测量,测量功率误差小于 2%。

关键词:漫透射; 激光; CCD 成像法; 光强分布; 功率

中图分类号:TN247 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0817002

Measuring far-field instantaneous facula intensity space-time distribution of solid-state laser

Li Yanna, Tang Litie, Xie Xiangyun, Yin Fei, Yu Zhichuang, Shen Lijuan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi′an 710024, China)

Abstract: A simple system of measuring solid-state laser instantaneous facula intensity space-time distribution was established, based on the principle of CCD diffused transmission imaging. Experiments of verifying the feasibility of this system were carried out, and the pulse laser spot images were obtained with precision, and the laser intensity space-time distribution parameters such as beam radius, facula dithering, beam quality, light distributions and average power were obtained through CCD measuring data which were processed by Matlab soft ware. At last, the experiment result show that the method of CCD diffused transmission imaging for measuring laser instantaneous distribution is feasible, and the system acquisition frequency could reach 120 Hz. This system had advantage of high resolution, high frame frequency, low-cost and easy to use, which could realize the synchronous measurement between large laser spot intensity distribution and power, with less than 2 percent power measured error.

Key words: diffused transmission; laser; CCD imaging method; intensity distribution; power

收稿日期:2015-12-24; **修订日期**:2016-01-27

作者简介:李艳娜(1985-),女,工程师,硕士生,主要从事激光器理论方面的研究。Email: liyanna@stu.xjtu.edu.cn

导师简介:唐力铁(1974-),男,副研究员,博士生导师,博士,主要从事激光器理论方面的研究。Email: tlt_laser@sina.com

0 引 言

激光在大气传输过程中,受到湍流、热晕和消光等影响，远场光强分布相对于激光器出口有较大变化,准确测量激光器远场光斑时空分布,对于评估激光系统输出光束质量、目标跟踪检测能力以及激光大气传输测量等方面具有重要意义[1-3]。

激光通过大气传输会产生湍流效应，对于瞬时光斑主要表现为光束扩展与光斑抖动[4]。湍流的时间特性用 Greenwood 时间常数 τ_0 来表示，其含义为在该时间范围内大气湍流保持基本不变，即可用冻结的湍流模型描述湍流[2]。τ_0 与大气湍流折射率结构常数 C_n^2 和风速 $v(h)$ 之间的关系如下[5]：

$$\tau_0=\{2.91k^2\sec\Omega\int \mathrm{d}hC_n^2(h)v^{5/3}(h)\}^{-3/5} \tag{1}$$

式中：$k=2\pi/\lambda$ 为波数；Ω 为观察方向天顶角；C_n^2 为高度 h 的湍流折射率结构常数。

对孔径为 D 的望远镜,相干时间为：

$$\tau=0.53*(r_0/v)*(D/r_0)^{1/6} \tag{2}$$

当 r_0=5 cm，v=2 m/s，D=0.3 m 时，计算得 τ=18 ms。若要使系统采样间隔小于 18 ms，则采样频率最低为 56 Hz。根据采样定理的要求，测试设备的采样频率要求高于 112 Hz，即几乎每 0.01 s 采集一帧光斑图像，可认为采集每帧图像期间大气湍流保持不变。

适合高重频固体激光远场光斑时空分布测量的方法主要有阵列探测法和 CCD 成像法[5-6]。阵列探测法的成本高、系统复杂、制作工艺难，且分辨率很难提高[5-7]。而 CCD 成像法测量激光光斑时空分布设备简单、使用方便、且测量精度高，且 CCD 相机具有灵敏度高，噪声低，响应速度快，体积小的优点。随着 CCD 技术的不断发展其动态范围也逐渐变大，使其在激光远场的测量中的应用更加广泛。

文中基于漫透射 CCD 成像法的原理，设计并建立一套固体激光远场瞬时光斑时空分布测量系统，能够实现激光远场相对于湍流瞬时光斑尺寸、光束质量、质心位置、光轴抖动、光强分布以及平均功率密度等参数的测量，采集频率可达120 Hz。该方法具有高分辨率、高帧频、低成本、使用方便的突出优点，能同时实现激光强度分布和功率的测量。

1 原理介绍

CCD 成像法可分为漫反射成像法和漫透射成像法[8]。在漫反射 CCD 成像法中，散射是表面散射，散射屏表面颗粒一致性对强度分布测量结果影响很大，且测量时漫反射屏平面与成像平面有一夹角使得成像有形状畸变和强度畸变，会增大事后数据处理的工作量，影响测量的不确定度，这使得漫反射成像法在很多使用中受限[9]。

漫透射 CCD 成像法通过选择近似于漫透射体的材料作为散射屏，利用 CCD 对散射光斑成像从而获得远场光斑图像，其工作原理如图 1 所示。入射激光照射到漫透射屏，漫透射屏对入射光进行体散射，CCD 相机对散射屏上的漫透射光斑进行成像，并采集光斑图像数据，通过计算机进行数据处理计算激光时空分布参数。

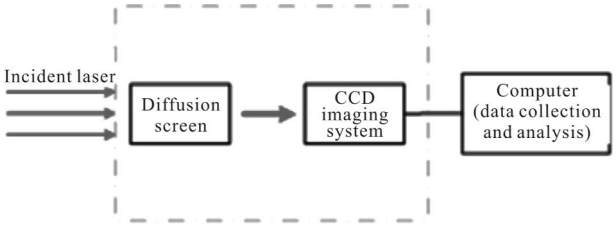

图 1 漫透射 CCD 成像法基本原理

Fig.1 Schematic of CCD diffused transmission imaging

所谓的漫透射，是指当激光照射到材料上时，在材料体内发生体散射，出射光会朝着各个方向散开[10]。常用的漫透射体有乳白玻璃、聚四氟乙烯板等乳白材料。为了准确测量光斑分布参数，需要漫透射屏的散射光为理想漫透射或接近理想漫透射。理想的漫透射体透射光满足余弦定律（朗伯定律），即不管入射光来自何方，透射光沿与漫透射屏成 θ 角度的光强 I_θ 总与 $\cos\theta$ 成正比：

$$I_\theta=I_N\times\cos\theta \tag{3}$$

式中：I_N 为漫透射屏法线方向的光强。

继而又有，与漫透射屏呈任意角度 θ 的方向光亮度 L_θ 可表示为：

$$L_\theta=\frac{I_\theta}{\mathrm{d}A\cos\theta}=\frac{I_N\times\cos\theta}{\mathrm{d}A\cos\theta}=\frac{I_N}{\mathrm{d}A}=C \tag{4}$$

式中：C 为常数。可见，理想的漫透射体在个方向的光亮度是相同的。也就是说，当激光照射到理想的漫

透射屏上,则其透射光场便是确定的,且透射光场分布随激光入射角度变化很小。利用漫透射 CCD 成像法来测量激光远场瞬时光斑时空分布测量设备能够实现集成设计,对于测量流程的简化有一定优化作用。

为了确保测量系统测量结果的可靠性,需要对专门定制的漫透射屏的漫透射特性进行测量。测量光路如图 2 所示,激光束分别以与漫透射屏法线成 0°和 15°角度入射,功率计探头 a 在以屏底边为直径的半圆上,以与漫反射屏法线方向夹角为 75°为起点,每隔 5°选取一个测试点,如果测得激光强度分布满足公式(3),说明选用的漫透射屏为较理想的漫透射体。

图 3 为聚四氟乙烯板漫透射屏角谱特性测量结果。测量结果表明,定制的聚四氟乙烯板为接近理想的漫透射材料。

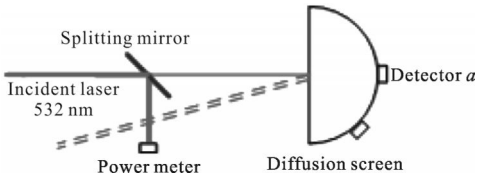

图 2 漫透射屏漫透射性能测量示意图

Fig.2 Sketch of diffusion screen′s transmission properties measurement

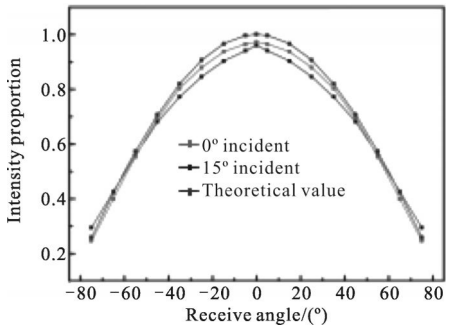

图 3 漫透射屏角谱特性测量结果

Fig.3 Measurements of diffusion screen′s angle spectrum properties

2 测量系统装置

图 4 为固体激光时空分布测量系统结构示意图。测量系统由漫透射屏、滤光片、衰减片、CCD 相机、相机镜头、三脚架以及数据处理计算机组成。

系统主要部件功能描述如下:

(1)漫透射屏

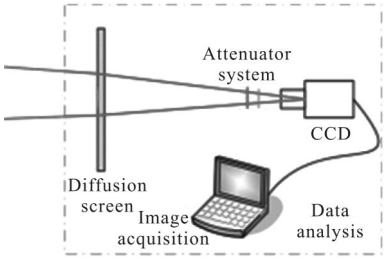

图 4 固体激光远场时空分布测量系统结构

Fig.4 Measurement system structure of solid-state laser facula intensity space-time distribution

用于接受激光的辐射,并对激光进行漫透射射,相当于对进入 CCD 相机的激光进行了一次衰减。该系统的漫透射屏选用的是聚四氟乙烯材料制成。

(2)CCD 相机

用于对漫透射屏散射的部分激光进行成像,采集存储激光远场图像,需较高的采集频率与像素深度。本系统相机分辨率为 640×480,最高帧频 120 帧/s,像素深度 8bit。

(3)相机镜头

镜头可使使光线聚焦到 CCD 相机的成像面上,确保 CCD 相机可获得清晰的图像。镜头采用标准 C 口,规格为 1/2″,焦距 8~48 mm 可手动调节,光圈范围 f1.0-CLOSE。

(4)衰减片

衰减片用于对激光进行衰减,通过选择合适的衰减倍率的衰减片,使合适强度的激光进入 CCD 相机成像。该系统分别利用对系统固体激光透过率为 50%、10%、1%、0.1%、0.01%等的衰减片,组合使用能够满足不同的衰减倍数。

(5)滤光片

选择中心波长为激光波长的滤光片,尽量减少进入 CCD 相机的杂散光。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据处理

利用软件采集处理存储的图像信息,通过数据处理计算得到光斑强度分布参数:光斑质心位置、光强分布及光斑尺寸等。

(1)激光束强度分布

理想情况下,光斑强度分布由探测面上所有点处的功率密度,即 $I(x,y)$决定。在 t 时刻第 f 帧第 m个

探测单元测得的光斑强度空间分布 $I_m(f)$为：

$$I_m(f)=k_m[I_{mt}(f)-I_{bm}] \tag{5}$$

$$I_{bm}(f)=\frac{1}{M}\sum_{f=1}^{M}I_{bm}(f') \tag{6}$$

式中：k_m 为探测单元号 m 的光强标准系数；$I_{mt}(f)$为各探测单元的瞬时激光强度，包括激光强度信号和 CCD 背景信号的贡献；I_{bm} 为各探测单元本底强度；$I_{bm}(f')$为各探测单元瞬时背景强度；M 为背景图片采集帧数。

(2)光斑质心位置

光斑质心位置计算公式如[11]：

$$\bar{x}=\frac{1}{P}\iint xI(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\approx\frac{1}{P}\iint_{\sigma}xI(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\frac{1}{P}\iint_{\sigma_n}x_nI(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\frac{1}{P}\sum_{n=1}^{m}x_nP_n \tag{7}$$

$$\bar{y}=\frac{1}{P}\iint yI(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\approx\frac{1}{P}\iint_{\sigma}yI(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\frac{1}{P}\iint_{\sigma_n}y_nI(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\frac{1}{P}\sum_{n=1}^{m}y_nP_n \tag{8}$$

式中：x_n，y_n 表示面元 σ_n 的几何中心。

(3)光斑半径及光束质量

环围半径是指光斑能量占总能量 x%时光斑的尺寸，x%的取值激光波长 λ、出光口径的外径 D 与遮拦比 ε 以及传输距离 L。环围半径计算公式为：

$$e(r_{x\%,\mathrm{real}};t)=x\%E(\infty;t) \tag{9}$$

式中：x%为环围能量比；$E(\infty;t)$为 t 时刻的激光功率。

光束衍射极限倍数 β 为[5]：

$$\beta=\frac{r_{x\%,\mathrm{real}}}{r_{x\%,\mathrm{idea}}} \tag{10}$$

式中：$r_{x\%,\mathrm{real}}$ 为实际光斑的 x%环围能量半径；$r_{x\%,\mathrm{idea}}$ 为理想光斑的 x%环围能量半径。对于中心遮拦比为 ε 的环形光斑，远场实际光斑半径为[5]：

$$r_{x\%,\mathrm{idea}}=\eta\cdot\frac{\lambda L}{D} \tag{11}$$

式中：η 为遮拦比是 ε 的环形光束衍射特征参数。因此，光束质量 β 可由下式计算得到：

$$\beta=\frac{Dr_{x\%,\mathrm{real}}}{\eta\cdot\lambda L} \tag{12}$$

3.2 测量系统功率标定

由于 CCD 相机灰度值与入射激光功率的关系是线性的，通过对测量系进行标校后可以估算得到武器系统的到靶功率。利用标准功率计对 CCD 相机进行标定，标定光路如图 5 所示。标定系数 A 通过下式算得：

$$A=\eta P/\mathrm{ADU} \tag{13}$$

式中：P 为某系统输出总功率；ADU 为 CCD 相机采集积分光斑图像灰度值总和；η 为激光束水平传输 500 m 的传输效率。

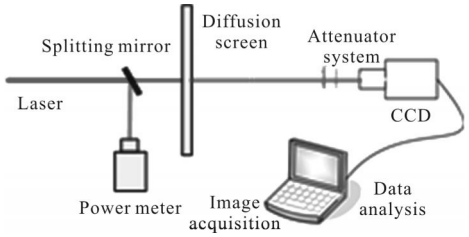

图 5 测量系统功率标定光路图

Fig.5 Optical path diagram of measurement system′s power calibration

通过采集 10 组功率数据，由公式(13)计算得到 CCD 相机标定系数 A。然后，通过测量数据 CCD 积分 ADU 值反推激光到靶功率，得到的 CCD 与功率计测量功率的误差曲线，如图 6 所示。

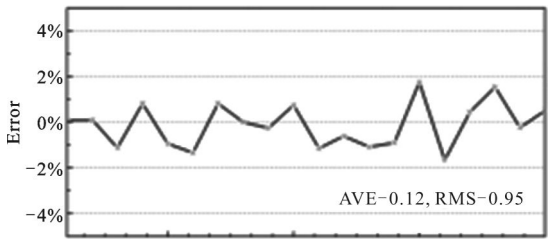

图 6 CCD 测量激光功率误差曲线

Fig.6 Error curves of laser power measured by CCD

由图 6 可以看出，利用 CCD 相机测量得到激光远场到靶激光功率与功率计测量值偏差较小，因此可以利用该方法估算到靶功率。

3.3 数据分析与讨论

利用该测量系统对某系统传输 500 m 远场光斑进行测试，计算得到激光远场光斑尺寸、光束质量、质心位置、光轴抖动、光强分布以及平均功率密度等参数。

3.3.1 理论分析

激光束在大气传输过程中光束波前会随机起伏，引起光束抖动、光斑漂移、强度起伏和光束扩展[2]。大气传输过程中，激光远场的瞬时光斑的光束扩展

是主要包括激光自由衍射和光束扩展的综合结果。

激光束传输过程自由衍射产生的发散角为[5]：

$$\sigma_{\mathrm{d}}=1.22\beta\frac{\lambda}{D} \tag{14}$$

式中：β 为某系统出口发射激光的光束质量；λ 为激光的波长；D 为某系统发射口径。

此外，大气湍流会产生光束漂移和光束扩展。大气湍流效应可以看作在激光的传输路径上有许多尺度为相干长度 r_0 大小的楔境。从微观的角度，光束会在楔境上发生衍射，使光束扩展，光束扩展的角半径为[5]：

$$\sigma_{\mathrm{d}}=1.22\frac{\lambda}{r_0} \tag{15}$$

因此激光在大气中传输时，远场瞬时光斑的角半径 θ 可表示为[5]：

$$\theta=\sqrt{(1.22\beta\lambda/D)^2+(1.22\lambda/r_0)^2} \tag{16}$$

则远场瞬时光斑半径为[5]：

$$r_{理论}=\theta\cdot L \tag{17}$$

式中：L 为激光束传输距离。

因此对于中心遮拦比为 ε 的环形光束，光束质量 β 可由下式计算得到[5]：

$$\beta=\frac{Dr_{理论}}{\eta\cdot\lambda L} \tag{18}$$

进一步可以得到靶上平均功率密度：

$$I_{\mathrm{AVE}}=\frac{\eta P}{\pi r_{理论}^2} \tag{19}$$

针对某系统发射激光，输出口径 D=300 mm，输出功率 P=60 W，传输效率 η=80%，激光束传输距离 f=500 m，根据公式(17)~(19)分别可计算出 r_0=15 cm 情况下，激光远场光斑半径、光束质量以及靶上平均功率密度。当大气相干长度为 15 cm 时，瞬时光斑半径理论值约为 2.2 cm，激光光束质量理论值约为 23.1，平均功率密度为 3.2 W/cm²。

3.3.2 实验结果分析

利用激光远场瞬时光斑时空分布测量系统对固体激光远场激光光斑进行采集，采集时长为 8 s，采集频率为 120 Hz。图 7 为开始采集后 2 s、4 s、7 s、8 s 的瞬时光斑强度分布图。由图可以看出，激光远场瞬时光斑的光强分布都随时间有较大的变化。

图 8 为瞬时光斑光束质量随时间变化曲线，激光光斑理论光束质量为 23.1，而测量所得瞬时光斑

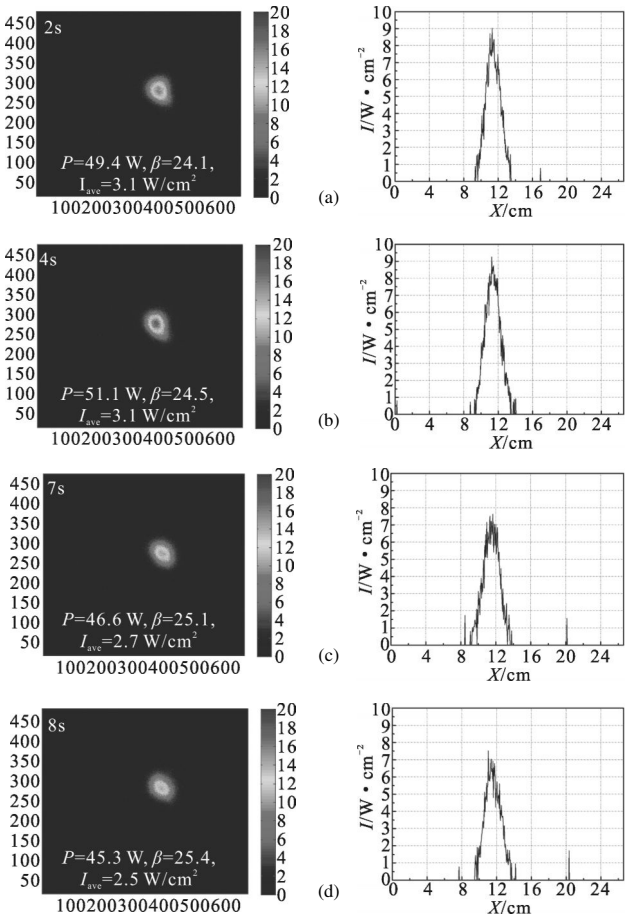

图 7 瞬时光斑光强分布

Fig.7 Intensity distribution of instantaneous facula

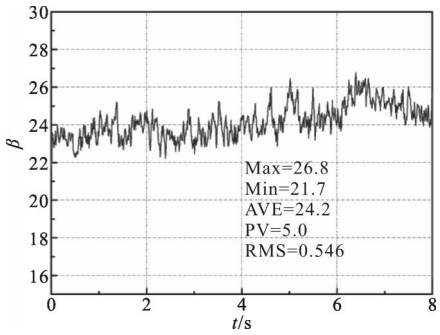

图 8 激光瞬时光斑光束质量随时间变化曲线

Fig.8 Curves of laser instantaneous facula beam quality changes vs time

光束质量平均值为 24.2。

图 9 为激光远场积分光斑强度分布图。图 8(a)为激光光强分布图，图 9(b)与(c)分别为积分光斑分别沿 X 方向切面与 Y 方向切面的光强分布图。CCD 相机测量某系统输出激光到靶功率约为 47.1 W，而系统理论平均功率为为 48 W，误差仅为 1.9%。测量积分光斑半径约为 2.27 cm，平均功率密度为 2.9 W/cm²，而

理论值约为 3.2 W/cm²。

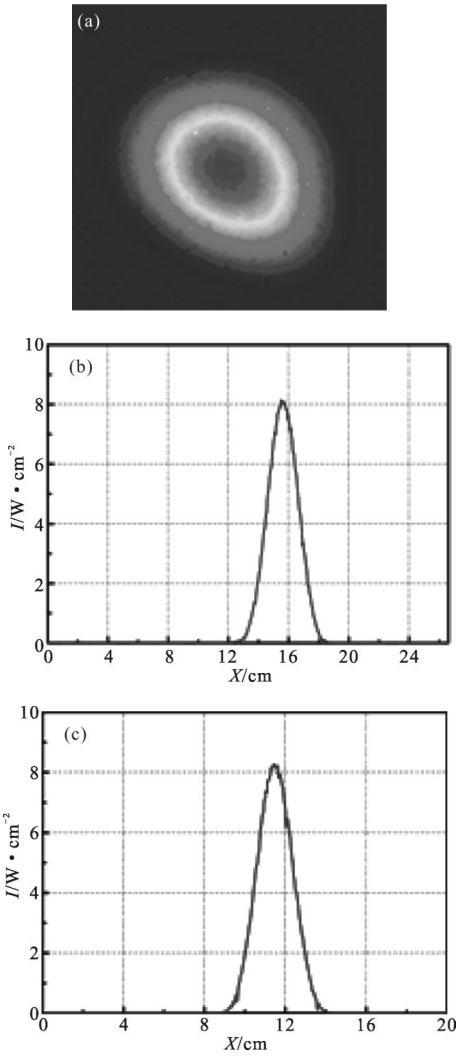

图 9 激光积分光斑光强分布

Fig.9 Intensity distribution of laser integral facula

图 10 为不同湍流情况下激光瞬时光斑质心轨迹。图 11 为弱湍流(r_0=15 cm)情况下激光瞬时光斑质心分别沿 X 方向和 Y 方向的抖动曲线,沿 X 方向质心抖动的 PV 值为 12.3, 均方根误差 RMS 为 2.23,沿 Y 方向质心抖动的 PV 值为 15.0,均方根误差 RMS 为 2.96。图 12 为强湍流(r_0=4 cm)的情况下激光瞬时光斑质心分别沿 X 方向和 Y 方向的抖动曲线,沿 X 方向质心抖动的 PV 值为 25.9,均方根误差 RMS 为 4.3, 沿 Y 方向质心抖动的 PV 值为 26.4,均方根误差 RMS 为 4.5。由图 10~12 可以看出,文中强湍流情况下引起的瞬时光斑质心抖动量几乎是弱湍流情况的 2 倍, 较强湍流会导致激光光斑更剧烈的抖动,从而使光斑尺寸变大、光束质量变差。

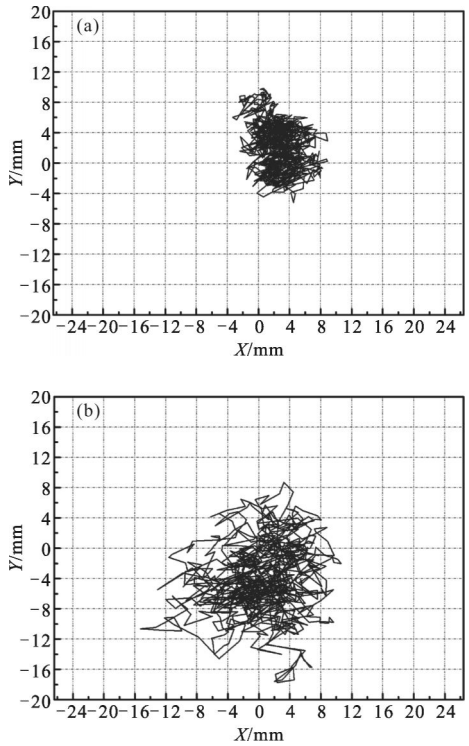

图 10 不同湍流情况下激光瞬时光斑质心轨迹

Fig.10 Track of centroid of laser instantaneous facula with different turbulent

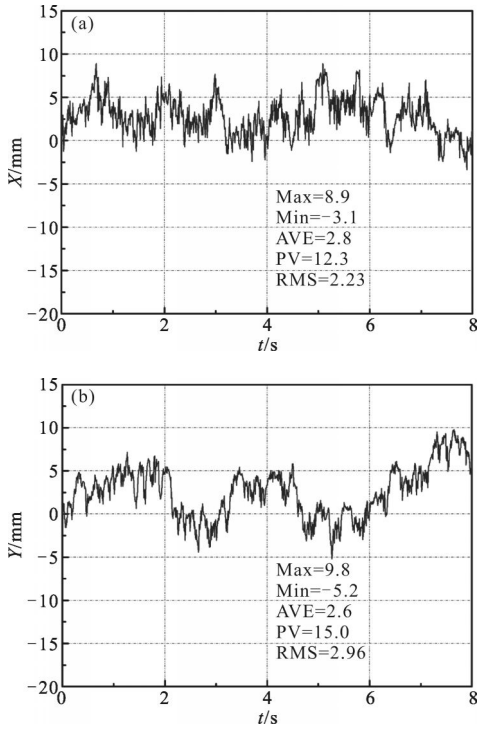

图 11 弱湍流激光瞬时光斑抖动曲线

Fig.11 Centroid jitters of laser instantaneous facula with weak turbulent

由以上实验数据可以看出,利用漫透射 CCD 成

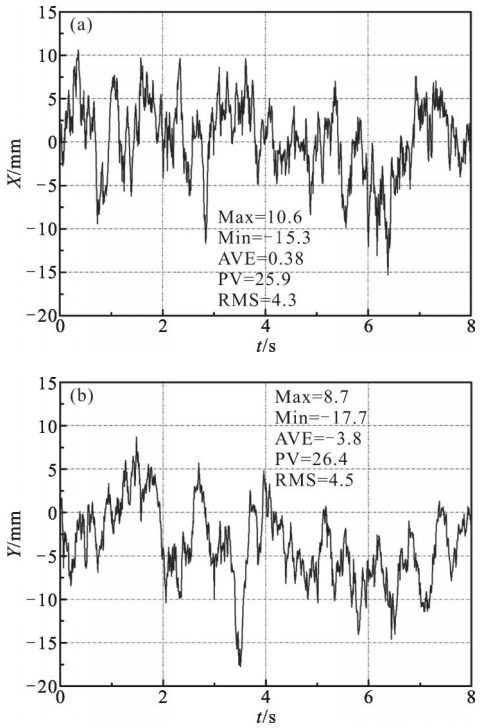

图 12 强湍流激光瞬时光斑抖动曲线

Fig.12 Centroid jitters of laser instantaneous facula with strong turbulent

像法测量系统获得的光强分布实验数据与理论结果基本吻合，可见该测量系统实现了激光远场瞬时光斑强度分布测量功能。

4 结 论

文中基于漫透射 CCD 成像法研究了固体激光瞬时光斑时空分布测量技术，建立了漫透射 CCD 成像测量系统并开展了相关验证实验。利用该测量系统能够精确地测量激光远场光斑图像，结合 Matlab 软件事后对测量数据进行处理，得到激光远场光斑尺寸、光束质量、质心位置、光轴抖动、光强分布以及平均功率密度等参数。测试系统采集频率可达 120 Hz，测量功率误差小于 2%。该方法具有高分辨率、高帧频、低成本、使用方便的突出优点。目前，CCD 相机动态范围越来越大，噪声处理技术也越来越好，这种基于 CCD 成像法的激光参数测量方法在高能激光系统中有较好的应用前景。

参考文献：

[1] 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)

[2] Wang Fei, Xie Yongjie, Ji Yunfeng, et al. Compound detector array for measuring intensity distribution of large caliber laser beam[J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(6): 658-662. (in Chinese)

[3] Li Bo, Wang Tingfeng, Wang Dinan, et al. Simulation of laser beam propagation through turbulence[J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(3): 289-295. (in Chinese)

[4] Huang Jipeng, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. Precise position measuring system for laser spots [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2013, 21(4): 841-848. (in Chinese)

[5] Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2004. (in Chinese)

[6] Guan Youguang, Fu Shuzhen, Gao Xueyan, et al. A novel high energy laser beam detector for measuring energy distribution [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2000, 12(2): 175-177. (in Chinese)

[7] Duan Liuhua, Xie Yongjie, Ji Yunfeng, et al. Development of laser beam energy distribution measuring array based on calorimetric techniques [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(6): 1110-1114. (in Chinese)

[8] Wang Fei, Xu Zuodong, Ji Yunfeng, et al. Measurement system for laser intensity distribution based on scanning diffuse reflection imaging[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(7): 2219-2222. (in Chinese)

[9] Pang Miao, Zhou Shan, Wu Juan, et al. Research on scattering sampling and attenuating in measurement of laser intensity distribution [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(12): 3213-3217. (in Chinese)

[10] Tian Qian, Liao Yanbing, Sun Liqun. Optical Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 91-92. (in Chinese)

[11] Gao Xueyan, Su Yi, He Junzhang, et al. Uncertainty of spot moment parameters measured with array detectors [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2004, 24(10): 1411-1416. (in Chinese)