

漫反射成像法的激光参数测量系统设计

程乙轮^{1,2,3}, 谭逢富^{1,3}, 何 枫^{1,3}, 侯再红^{1,3}, 秦来安^{1,3}, 王 浩^{1,3}, 黄志刚^{1,3}, 吴德成^{1,3}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所
中国科学院大气光学重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026;
3. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 230037)

摘要: 精确地测量激光在大气传输后的光斑参数, 是研究激光大气传播效应和分析激光发射系统性能的关键技术手段。测量激光远场参数的方法主要包括阵列探测法和相机成像法, 目前在激光大气传输效应的测量评估中大都采用阵列探测法。由于探测器阵列靶受物理空间和研发成本等因素的限制不能均匀且高分辨率紧密排布, 将造成采样光斑的失真, 难以精确地测量远场光斑参数。针对此问题, 利用相机分辨率高的特点, 设计了一套基于漫反射屏成像法的激光参数测量系统。该系统最小测量分辨力小于 0.39 mm, 质心位置平均偏差为 0.05 mm, 测量光斑到靶功率不确定度优于 10%。该系统能有效地测量激光发射系统的跟瞄精度和到靶功率, 为分析激光大气传输效应和分析激光发射系统性能提供有效手段。

关键词: 漫反射成像; 光斑参数; 激光大气传输; 跟瞄精度

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210921

Design of laser parameter measurement system based on diffuse reflection imaging

Cheng Yilun^{1,2,3}, Tan Fengfu^{1,3}, He Feng^{1,3}, Hou Zaihong^{1,3}, Qin Laian^{1,3},
Wang Hao^{1,3}, Huang Zhigang^{1,3}, Wu Decheng^{1,3}

1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: Accurate measurement of laser spot parameters after transmission in the atmosphere is a key technical means for studying the effects of laser atmospheric propagation and analyzing the performance of laser emission systems. The methods of measuring laser far-field parameters mainly include array detection method and camera imaging method. However, the current measurement and analysis of laser atmospheric transmission effect basically use array detection method. Because the detector array target detectors cannot be arranged uniformly and tightly due to the limitations of space physics and R&D costs, this will cause the distortion of the sampling spot and the far-field spot parameters cannot be accurately measured. Aiming at this problem, a set of laser

收稿日期: 2022-02-20; 修订日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41875033)

作者简介: 程乙轮, 男, 博士生, 主要从事激光参数测量方面的研究。

导师简介: 侯再红, 男, 研究员, 博士, 主要从事激光大气传输、激光大气参数测量等方面的研究。

parameter measurement system based on diffuse reflection imaging method is designed in combination with the high resolution of the camera. The minimum measurement resolution of the system is less than 0.39 mm, and the average deviation of the centroid position is 0.05mm, the uncertainty of the power from the measurement spot to the target is better than 10%. The system can effectively measure the tracking accuracy and target power of the laser emission system, and has accumulated a certain theoretical basis and experimental data for analyzing the laser atmospheric transmission effect and analyzing the performance of the laser emission system.

Key words: diffuse reflection imaging; spot parameters; laser atmospheric transmission; tracking accuracy

0 引言

由于激光具有良好的方向性好,突出的单色性、高亮度等特点,激光技术被广泛应用到工业制造领域、国防军事领域以及生物医学领域^[1-2]。准确的测量激光光斑远场分布情况是评价激光发射系统性能和激光大气传输特性最直接有效的手段^[3-4]。

目前对于激光远场光斑参数测量的方法有许多,主要包括:烧蚀法、感光法、扫描法、阵列探测法、基于相机的成像法^[5-7]。烧蚀法作为一种粗略的光斑尺寸测量方法,不能获得光斑的质心抖动、光斑能量等光斑参数,也不能获得激光在照射过程中光斑的实时变化;感光法同样也不能定量的获得各项测试参数;扫描法虽然能定量地获得远场光斑参数,但是其自身结构复杂需要精密的机械结构设计和复杂的逻辑系统设计。

阵列探测法是将对特定波长敏感的探测器按照一定的规律进行排布形成阵列靶板,入射激光通过衰减取样系统后照射在探测器上,探测器通过光电效应产生电信号,再对电信号进行数字转换处理从而获得激光强度分布的测量数据^[8-11]。但是由于探测器受空间物理限制和研发成本的限制不能均匀且紧密地排布,这将造成采样光斑的失真导致远场激光参数测量的精度不够等问题。

基于相机成像法的激光参数测量系统根据光斑的取样方式又可以分为直接成像法和间接成像法。直接测量法是使入射激光直接进入相机镜头,相机实现光电信号的转换后传输至数据处理终端得到数字图像,最后通过一些数据处理方法得到光斑参数^[12-13]。间接测量法是将入射激光束照射至标准的漫反射靶板上,相机在固定位置拍摄反射光后得到光斑图像数据,最终经过数据处理得到远场光斑的各项参数。

因此,阵列探测法和基于相机成像的方法仍然是激光远场参数测量领域的研究的一个热点。由于相机具有阵列探测法所不能达到的高分辨力,在一些测量场景的应用中具有更高的精度优势。但是采用漫反射成像法时由于相机与靶面夹角的影响需要对图像进行校正^[14-16],且不能保证试验中夹角大小相同,导致校正精度的降低。文中针对漫反射成像法难以系统集成和系统可能需要对采集图像需要多次校正的问题,设计了一套基于漫反射成像的激光参数测量系统。

1 漫反射成像法简介

漫反射成像法由漫反射屏、相机、衰减片组合以及数据处理终端等组成。在测量过程中激光照射至标准的漫反射屏上,反射光激发相机图像传感器的光电二极管并释放电荷产生电信号,经过内部的 A/D 模块将电信号转化为数字信号,从而实现激光强度到灰度图像的映射,在这一过程中图像的灰度值和入射激光的光强成正相关。

当入射光束垂直于漫反射屏时,相机与漫反射屏的法线方向会存在一定的夹角。若相机与漫反射屏法线方向夹角较小时,由相机与漫反射板间角度带来的误差对测量系统的误差影响可忽略不计。但是在激光远场光斑测量过程中,由于光束受到湍流起伏的影响光束发生扩展、漂移,到靶光斑尺寸变大,这将可能导致入射光束照射到相机,对相机造成损害。因此相机与漫反射屏的夹角需预留足够的余量(一般认为大于 15°),此时测到的光斑图像会有明显的几何畸变,需要对其进行校正处理。此外,当入射激光束的能量较高时,需要在相机镜头前添加衰减组合,否则采集得到的光斑图像将饱和,无法显示图像的细节并

对计算参数带来很大的误差,更严重的将会导致相机光敏面损坏。

2 测量系统结构

2.1 硬件总体结构

测量系统结构如图 1 所示,测量系统硬件主要由漫反射屏、图像采集测量系统、信标系统、安装调整支架等组成。为了使系统在降低质量的同时使各个分系统间能保持刚性连接,整体框架选用碳纤维材料和铝合金材料组合而成。漫反射屏由一块 260 mm×260 mm 的正方形铝板制作而成,并在表面采用喷砂镀金的方式来使靶面具有良好的均匀性和一定的抗强光能力。三根碳纤维管构成一个三角形结构,铝合金结构与碳纤维之间采用压接的形式,使铝合金固定件与碳纤维管间无相对运动,使得连接支架具有足够的刚性,进而使相机与靶面保持固定角度,并且不会产生相对运动,使测量系统具有较高的测量精度。

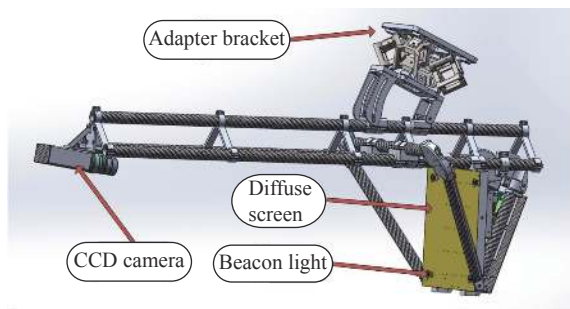


图 1 测量系统结构图

Fig.1 Measurement system structure diagram

该系统的相机选用一款分辨率为 2 048×1 088 pixel 的近红外扩展型硅探测器相机,像元尺寸为 5.5 μm,搭配焦距为 12.5 mm 的近红外镜头。根据相机的成像原理,相机与靶面的距离和采集图像分辨率的关系可表示为:

$$M = \frac{5.5 \times 10^{-3}}{12.5} \times L \quad (1)$$

式中: L 为相机与靶面中心位置的距离(单位为 mm); M 为相机采集图像的分辨率。为了确保图像分辨率优于 0.5 mm/pixel,则 L 最大为 1 136.4 mm。另外,在相机与靶面一定距离的情况下,为使整个漫反射靶面在相机视场中采集图像的分辨率应尽可能的大,但是

随着图像分辨率的增加也会造成采样帧频的降低。

在激光参数测量系统中,图像采集系统中单帧图像的采样时间应与一个湍流冻结时间接近(一般认为一个湍流冻结时间为 10~20 ms)。所以系统中相机距靶面距离设计为 880 mm,图像窗口分辨率为 645×645 pixel,此时系统采样帧频大于 52 Hz。

(1) 漫反射靶面及信标系统

该系统采用漫反射靶板作为远场光斑的接收设备,如图 2 所示。靶面尺寸设计为 260 mm×260 mm 的正方形,靶面采用铝板喷砂镀金的加工方式。由于该系统在测量时与激光发射系统是一种合作信标的工作模式,相机与靶面的位置需要进行校正,所以在靶面的四个边角位置安装了四个信标光源,单灯功率大于 1.5 W,发散角大于 30°,信标灯的亮度可根据天空背景亮度进行调节。由于相机量子效率在 650 nm 波段较高且能与被测 1 064 nm 波段激光在波长上间隔较远,通过长波通滤光片即可对其进行过滤,不会对测量系统的精度造成不利影响。

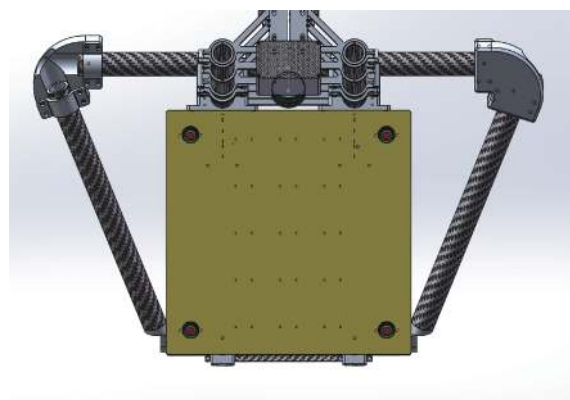


图 2 漫反射靶面示意图

Fig.2 Schematic diagram of diffuse reflection target surface

靶面的半球方向反射比(Directional Hemispherical Reflectance, DHR)在 1 064 nm 的中心波段接近 92%,具有较高的反射率,说明靶面可以承受较高功率密度的激光辐照,具有较好的抗激光损失能力。在 20°的范围内,双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)因子小于 0.5%,从表 1 可以看出,面板在喷砂镀金处理后能满足系统设计需求。

(2) 衰减组合

由于系统使用的是可见光相机,为了避免可见光

表 1 漫反射靶面半球反射比数据

Tab.1 Diffuse target surface hemispherical reflectance data

Wavelength/nm	Directional hemispherical reflectance
1030	0.918
1040	0.918
1050	0.919
1060	0.919
1064	0.920
1070	0.920

波段的杂散光对系统测量精度造成影响,在相机镜头前加入长波通滤光片进行杂散光的滤除。在入射光束的中心波段为 1050 nm,半带宽为 20 nm 时,透过率为 85% 左右,动态误差为 1.46%。具有较高的均匀性,能满足系统设计需求。

2.2 系统软件架构

测量系统软件部分由数据采集模块和数据处理分析模块组成。数据采集模块实现采集参数的设置、图像的畸变校正以及储存等功能;数据处理分析部分实现图像数据的处理分析功能,得到激光束远场光斑图像的跟瞄精度、光束质量 β 因子、到靶功率、光斑直径、环围功率比等一系列光斑参数。

(1) 数据采集模块

在数据采集模块设计中,最重要的是图像的畸变校正处理,由于相机与靶面存在一定的固定角度偏差,相机在对靶面成像时会形成光斑图像的几何畸变和能量分布的畸变,所以在图像采集前要进行图像的几何畸变校正。图像几何校正的方法首先是根据图像畸变前后的图像特征点位置坐标信息,建立畸变校正模型,其次是利用已知条件确定校正模型参数,最后根据畸变前后的映射关系重新对图像进行赋值。假设畸变图像为 $f(x,y)$,畸变校正处理后的图像为 $F(X,Y)$,那么畸变前后图像坐标点 (x,y) 和 (X,Y) 的关系可表示为:

$$\begin{cases} X = j(x,y) \\ Y = i(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $j(x,y)$ 和 $i(x,y)$ 分别表示图像上 x 方向坐标和 y 方向坐标产生几何畸变时的畸变函数。这种畸变可分为简单的线性畸变和非线性畸变,两种情况下像素的变换可由下式给出:

$$\begin{cases} j(x,y) = k_1X + k_2X + k_3X \\ i(x,y) = k_4Y + k_5Y + k_6Y \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} j(x,y) = k_1 + k_2X + k_3Y + k_4X^2 + k_5XY + k_6Y^2 \\ i(x,y) = k_7 + k_8X + k_9Y + k_{10}X^2 + k_{11}XY + k_{12}Y^2 \end{cases} \quad (4)$$

在图像畸变校正约束点的选取中,通常选用一个四边形的顶点作为约束对应点,在这种情况下畸变模型可以用一对双线性等式来表示,其表达式为:

$$\begin{cases} j(x,y) = k_1X + k_2Y + k_9XY + k_4 \\ i(x,y) = k_5X + k_6Y + k_7XY + k_8 \end{cases} \quad (5)$$

在该系统的校正中可选取靶面四个信标灯为特征点,点亮信标灯后采集靶面图像并对其进行二值化处理利用 opencv 中的霍夫变换检测圆形并获取其圆心位置坐标。由于信标灯的位置在靶面上构成标准的正方形,所以选取四点中的任意一点为起始点,任意相邻两点间的距离为边长做正方形即可得到图像上特征点的理想位置坐标将四个点的位置坐标代入公式 (5) 中即可求取畸变校正函数,最后根据映射关系对其重新赋值即可完成图像的校正,图像畸变校正前后的图像如图 3 所示。

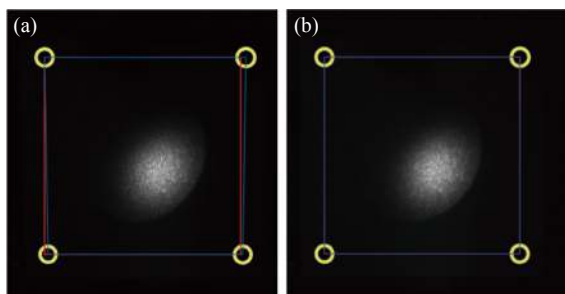


图 3 畸变校正前后光斑图像。(a) 畸变校正前光斑图像; (b) 畸变校正后光斑图像

Fig.3 Spot image before and after distortion correction. (a) Spot image before distortion correction; (b) Spot image after distortion correction

图 3 中蓝色方框为畸变校正前获取特征点的所围四边形,红色方框为特征点的理想位置坐标。校正后特征点的理想位置坐标和实际位置坐标如表 2 所示,最大偏差仅为 3.65 pixel,从而可以看出这种畸变校正方法是积极有效的。

(2) 数据处理模块

测量系统在获取远场激光强度时空分布后即可

计算激光到靶功率、光斑质心位置、质心位置抖动、光斑环围直径、激光衍射极限倍数等参数。不同的参数表征着不同的物理意义,例如,激光到靶功率表示的是激光大气传输透过率特性;光斑的质心位置和质心抖动则表示的激光发射系统的跟瞄性能;光斑环

围直径、衍射极限倍数等参数则是综合的效应,受激光大气传输效应和激光发射系统性能的影响。该系统主要用于测试激光发射系统的动态跟瞄性能,所以分析光斑的质心位置和质心抖动是最直接有效的方法。

表 2 畸变校正后特征点位置坐标

Tab.2 Position coordinates of feature points after distortion correction

Actual coordinate in Y direction/pixel	Actual coordinate in X direction/pixel	Ideal coordinate in Y direction/pixel	Ideal coordinate in X direction/pixel	Y direction deviation/pixel	X direction deviation/pixel
132.92	167.39	132.54	167.39	0.38	0
133.28	852.32	135.93	854.68	-3.65	-2.36
818.89	167.82	820.93	169.16	-2.04	-1.34
817.74	852.38	820.93	854.68	-3.19	-2.3

光斑的质心位置可以通过单帧图像获得其瞬时的质心位置坐标(单帧光斑质心位置坐标)和整个出光时间内长曝光图像的质心位置坐标(积分光斑质心位置坐标),通常情况下计算光斑的质心位置坐标选用的都是重心法来计算,将光斑的重心等效为光斑的质心。单帧光斑的质心位置坐标和积分光斑的质心位置坐标可由公式(6)和公式(7)求得:

$$\begin{cases} x(f) = \frac{1}{p(f)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}A_{ij}(f) \\ y(f) = \frac{1}{p(f)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}A_{ij}(f) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}A_{ij} \\ \bar{y} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}A_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

激光发射系统的跟踪精度定义为激光远场光斑瞬时质心位置围绕其平均质心位置变化的均方根值,即激光到目标上实际的跟踪误差,可用公式(8)表示:

$$\begin{cases} X_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{f=1}^F (x(f) - \bar{x})^2}{F}} \\ Y_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{f=1}^F (y(f) - \bar{y})^2}{F}} \end{cases} \quad (8)$$

激光发射系统的瞄准精度可定义为激光远场光斑平均质心位置坐标与预先设定的瞄准点之间的偏差,即目标上的实际光束瞄准偏差,可表示为:

$$\begin{cases} \Delta\theta_{tp,x} = \arctan\left(\frac{x_c - x_0}{L}\right) \\ \Delta\theta_{tp,y} = \arctan\left(\frac{y_c - y_0}{L}\right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_c 为积分光斑质心位置在靶面上的 X 坐标; y_c 为积分光斑质心位置在靶面上的 Y 坐标; x_0 为系统设定瞄准点在靶面上的 X 坐标; y_0 为系统设定瞄准点在靶面上的 Y 坐标。

3 实验分析

对于该系统相机与靶面的距离为 880 mm,相机镜头的焦距为 12 mm,相机像元尺寸为 5.5 μm ,因此系统的分辨力为:

$$\frac{5.5 \mu\text{m}}{12.5 \text{ mm}} \times 880 \text{ mm} \approx 0.39 \text{ mm} \quad (10)$$

为了验证系统的测量精度,设计了系统跟瞄精度的测量精度测试实验。实验示意图如图 4 所示,激光器输出激光束经扩束系统扩束后照射在靶面上,数据处理系统对数据进行分析处理。

在测试系统准备完毕的情况下通过上位机控制软件使平移台以 1 cm 的步长在水平方向移动,垂直方向保持静止,在不同功率下多次实验得到光斑的质心位置曲线如图 5 所示。实验中平移台水平移动三

次,因此图 5 中质心偏移曲线出现三个明显的“台阶”,四次实验得到光斑质心位置在移动过程中的数据如表 3 所示。

综上所述,平移台在以 10 mm 的步长移动时系统测量得到光斑位置移动的平均偏差为 0.05 mm,所以系统具有较高的测量精度。此外该系统在一定程度上兼具了测试到靶功率的能力,首先需要利用功率计对其功率进行标定,在功率标定后得到 ADU (Analog Digital Unit) 值与能量的转换系数从而实现能量的测试。

在相同的曝光时间下 (9000 μs) 改变系统的衰减

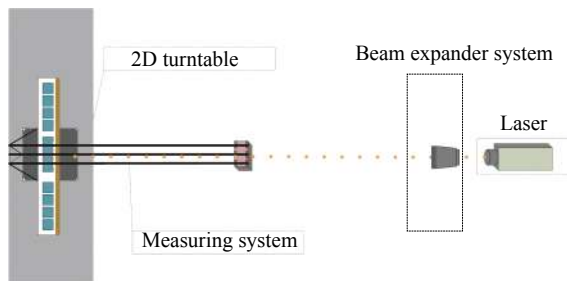


图 4 系统跟瞄精度测试示意图

Fig.4 Schematic diagram of system tracking accuracy test

倍率采集激光器以 40% 的输出功率出光得到的测量数据如图 6 所示,由于衰减系统采用的是中性衰减片,系统测量得到 ADU 值与衰减系统的透过率线性

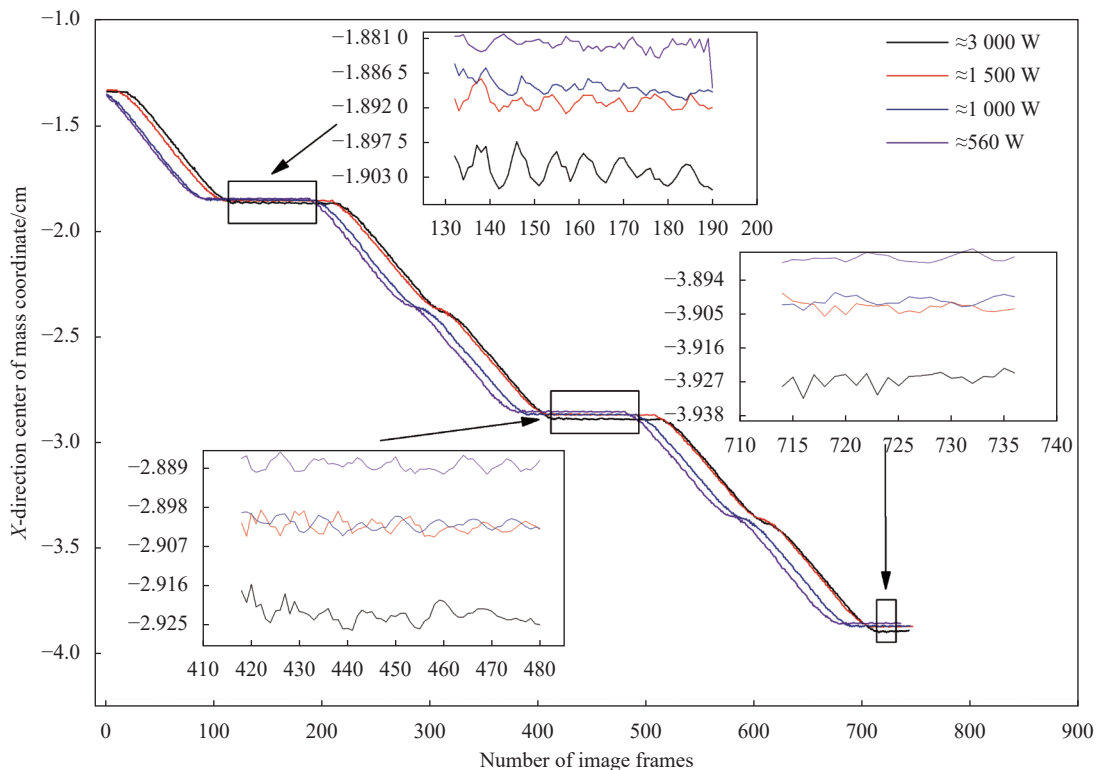


图 5 不同功率下光斑质心位置曲线

Fig.5 Curve of spot centroid position under different powers

表 3 光斑质心位置坐标数据

Tab.3 Coordinate data of spot centroid position

Laser output power/W	First location coordinates (X-direction)/mm	Second location coordinates (X-direction)/mm	Deviation/mm	Third location coordinates (X-direction)/mm	Deviation/mm
≈3000	-19.03	-29.24	10.21	-39.28	10.04
≈1500	-18.93	-29.04	10.10	-39.05	10.01
≈1000	-18.92	-29.01	10.09	-39.03	10.02
≈560	-18.84	-28.90	10.06	-38.89	9.99

相关性达到 0.99。

由图 6 可以看出,系统测量得到 ADU 值与衰减系统的透过率成正相关,而 ADU 值与曝光时间的大小也成正相关因此可以得到如下的能量计算公式:

$$P = ADU \times \left(\frac{\text{Expose Time}_0}{\text{Expose Time}_N} \right) \left(\frac{\text{Transmittance}_0}{\text{Transmittance}_N} \right) \times K \quad (11)$$

式中: ADU 为实际测试时得到 ADU 值; Transmittance₀ 和 Expose Time₀ 为系统进行能量标定时衰减系统的透过率和系统曝光时间; k 为标定功率下激光器实际出光功率与 ADU 值的比值。实际使用过程中通过改变曝光时间去调整系统的动态范围时会造成系统采样频率的变换,所以在固定的曝光时间下改变衰减系统的透过率更为合适,那么激光到靶功率可由公式 (12) 求得:

$$P = ADU \times \left(\frac{\text{Transmittance}_0}{\text{Transmittance}_N} \right) \times K \quad (12)$$

以激光器 70% 的出光功率、曝光时间为 20000 μs、

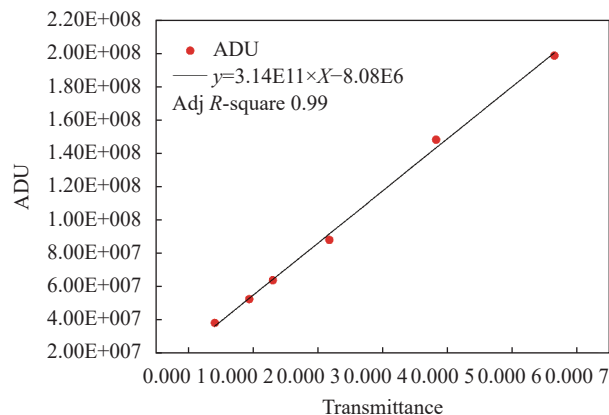


图 6 ADU 值与衰减系统透过率关系

Fig.6 Relationship between ADU and attenuation system transmittance

衰减透过率为 1.66E-5 的情况为标定条件得到的出光功率与 ADU 值的系数 k=6.30E-5。改变激光器的出光功率,并通过改变衰减系统的透过率测量得到的激光功率如表 4 所示,表中激光输出功率为校准后的功率计测量得到,且其测量不确定度为 2.1%。

表 4 激光功率测量结果

Tab.4 Results of laser power measurement

Laser output power/W	Attenuation system transmittance	Measured laser power/W	Uncertainty of measurement
1870	1.66E-05	1870	0
1340	2.72E-05	1400	4.29%
1220	4.13411E-05	1120	8.93%
620	9.26837E-05	584	6.20%

4 结论

针对漫反射成像法的激光参数测量系统,设计了以铝板为基底的喷砂镀金强光接收面板、相机以及衰减系统的激光参数测量系统。各分系统以碳纤维管为骨架进行连接,具有较高的稳定性和可靠性,避免了利用相机在图像采集过程中需要进行校正的问题。在跟瞄精度的测试实验中,系统测量分辨率为 0.39 mm,质心位置平均偏差为 0.05 mm;根据衰减系统的衰减特性拟合得到激光到靶能量的计算公式,不同功率下激光到靶能量测量不确定度优于 10%。该系统的成功研制为准确测量激光发射系统的跟踪精度和瞄准精度提供了一种新的方法,对评估激光发射系统的性能和研究激光大气传输特性具有重要的意义和工程应用价值。

参考文献:

- [1] Chen Y Q, Wang J H. Laser Principle [M]. Hangzhou: Zhejiang University Electronic Press, 2002: 1-39. (in Chinese)
- [2] Zuo T C. Manufacturing Laser Beam Quality Transmission Quality and Focus Quality [M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-6. (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] Zhu Wenyue, Qian Xianmei, Rao Ruizhong, et al. Evaluation technology of high energy laser atmospheric propagation performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1203002. (in Chinese)
- [5] Li Gaoping, Chen Chao, Li Dong, et al. Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser [J].

- Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 645-650.
- [6] Feng Guobin, Yang Pengling, Wang Qunshu, et al. Measuring technology for far-field beam profile of high power laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1615-1619. (in Chinese)
- [7] Wei Jifeng, Hu Xiaoyang, Zhang Kai, et al. Technologies and development trends of directly measuring high energy laser energy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0706004. (in Chinese)
- [8] Yang Penglin, Feng Guobin, Wang Zhenbao, et al. Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2): 521-525. (in Chinese)
- [9] Tan Fengfu, Huang Zhigang, Zhang Silong, et al. Detector array target calibration system based on point-by-point scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0213003. (in Chinese)
- [10] Wang Zhenbao, Feng Guobin, Yang Pengling, et al. Detector array for measuring spatio-temporal distribution of near infrared laser power density [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 935-938. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] Hu Linting, Lu Xiankui, Jin Junkun, et al. Laser facula measurement with CCD [J]. *Laser Technology*, 2001(2): 154-157. (in Chinese)
- [13] ESumachev K, Sharkov V V, Savikin A P, et al. Measurement of 1.94 μm YAP: Tm³⁺ laser beam quality using a CCD camera [J]. *Journal of Optical Technology*, 2020, 87(5): 262-265.
- [14] Meng Lingqiang, Ji Kunhao, Kong Qingqing, et al. Suppressing the influence of charge-coupled device vertical blooming on the measurement of laser beam quality factor (M2) of a near-infrared laser [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(2): 130-137.
- [15] Pang Miao, Yuan Xuewen, Gao Xueyan, et al. Spot distortion calibration in measurement of laser intensity distribution based on imaging by scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 451-455. (in Chinese)
- [16] Fan Yong, Zhang Jiacheng, Chen Niannian, et al. Image geometric distortion correction method [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(29): 184-197. (in Chinese)