

模块化的激光光束检测系统设计

肖文慧, 王芝学, 刘馨瑶, 孙诗涵, 孟睿*

天津职业技术师范大学电子工程学院, 天津

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年6月1日; 发布日期: 2026年6月10日

摘要

随着激光技术的持续发展, 对激光光束质量的要求也不断提高。目前市面上虽已出现多种激光光束质量检测系统, 但大多存在体积庞大、便携性差的问题。基于此, 本文设计了一种小型化、便于拆卸的激光光束质量检测系统。该系统通过自主设计光路、搭建系统架构, 经图像处理获取光斑直径, 进而测算出发散角, 并通过QT设计的人机交互界面直观呈现检测结果。

关键词

激光光束质量检测系统, 小型化, 人机交互界面

Design of a Modular Laser Beam Detection System

Wenhui Xiao, Zhixue Wang, Xinyao Liu, Shihan Sun, Rui Meng*

School of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

Received: April 7, 2026; accepted: June 1, 2026; published: June 10, 2026

Abstract

With the ongoing advancement of laser technology, there is an escalating demand for superior laser beam quality. While a variety of laser beam quality measurement systems are currently available on the market, most suffer from issues such as large size and poor portability. In light of these limitations, this study presents the design of a compact and easily detachable laser beam quality measurement system. The system utilizes a self-designed optical path and integrated system architecture to acquire spot diameter through image processing. Based on this, the beam divergence angle is calculated, and the measurement results are displayed intuitively via a human-machine interface developed using the QT framework.

*通讯作者。

Keywords

Laser Beam Quality Detection System, Miniaturization, Human-Machine Interaction Interface

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着激光技术的不断发展,激光在工业制造[1]、国防[2]、测量传感[3]等多个领域有着广泛的应用。随着激光的广泛应用,市场上对激光光束质量的要求也不断提高。

近年来,随着激光技术的不断发展,众多学者围绕不同激光器的光束质量开展了深入研究,旨在提升激光器的光束质量因子。在固体 MOPA 激光器中,高功率输出时由于热效应引起的波前畸变是导致光束质量下降的主要原因。针对这一问题,研究人员发展出热效应抑制技术、可变形镜法、相位共轭法、光束整形法、球差自补偿法和增益导引法等七类主要优化技术。其中,球差自补偿法和增益导引法因其结构简洁、优化效果显著,展现出广阔的应用前景,成为未来研究的重要方向[4]。阮鹏等人聚焦于非链式脉冲氟化氘(DF)中红外激光器的光束质量提升问题,采用内腔式正分支虚共焦非稳腔结构,设计了三种放大倍率的谐振腔,并对比了凸面反射镜的两种安装方式,有效提升 DF 激光器的光束质量和热稳定性,为远距离光电对抗提供了高质量中红外光源[5]。赵庆浩等人针对传统半导体激光器在高功率输出时存在的大发散角、多模和宽线宽问题,采用 Littman 型外腔结构,以锥形半导体激光器为内腔增益源,研制出一款高性能外腔半导体激光器[6]。

李炎冰等人针对机载光电传感器装机后无法原位检测红外与激光光轴一致性的问题,设计了一款基于卡塞格林式平行光管与图像处理系统的便携式光轴检测设备,实现了装机状态下红外与激光光轴一致性的快速精确检测[7]。然而,市面上的激光光束质量评价产品大多体积大、成本高,因此本文创造性地设计了一种小型化、便于携带的激光光束质量检测系统,该系统采用模块化独立结构实现光源与监测模块的灵活分离与便携拆装,在小空间内集成束腰测量、光斑质量判断与发散角识别功能,并结合 Python 图像处理流程(灰度转换、高斯拟合、阈值分割、形态学开运算及非线性最小二乘法拟合)实现光斑直径的精准提取与发散角计算。本系统目前已实现激光光斑的实时采集、高斯拟合、光斑直径与光束发散角的计算,可有效评估激光光束质量。在现有基础上, M^2 因子作为国际通用的激光光束质量评价核心指标,能够更全面地表征激光光束接近理想基模高斯光束的程度,是高精度激光检测与光路校准的重要依据。由于本系统已具备双光斑成像、多位置光斑直径测量及光路长度标定能力,未来需要进一步增加不同轴向位置的光斑尺寸采集模块,结合光束传输理论建立光斑尺寸随传播距离的变化曲线,即可完成 M^2 因子的在线测量。可通过优化光路结构、提升红外图像采集精度与亚像素定位算法,将系统升级为集发散角检测、光斑质量分析、 M^2 因子测量于一体的多功能激光模式智能监测平台,进一步拓展系统在精密光学检测、激光加工质量控制等场景的工程应用价值。

2. 技术原理

2.1. 高斯光束的强度分布

理想的激光基模(TEM₀₀)在横截面上的光强分布不是均匀的,而是遵循高斯分布。其光强 $I(r)$ 随距

离 r 的变化规律为:

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-\frac{2r^2}{w}} \quad (1)$$

其中, I_0 是中心($r=0$ 处)的最大光强(峰值亮度); w 是光束的腰斑半径。因为高斯曲线无限延伸, 理论上没有绝对的边界, 因而在激光技术中, 通常不直接用强度降为 0 的地方定义光斑边界, 而是约定俗成地用光强降到中心峰值强度的 $\frac{1}{e^2}$ (约 13.5%) 处或 $\frac{1}{e}$ (约 36.8%) 处的半径作为光斑的标准半径[8]。

为了与背景均匀、光斑近似圆对称且信噪比较高的场景更好适应, 本文将一个一维高斯函数定义为零均值形式:

$$f(r) = a \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中 a 为振幅, 决定高斯曲线的最大高度, 在光斑拟合问题中, a 对应光斑中心的理论最大灰度值或光强; σ 为标准差, σ 越大, 曲线衰减越慢, 光斑越“弥散”; r 为径向距离, 表示待求点与光斑中心的欧氏距离。该高斯函数假设峰值严格出现在 $r=0$ 处, 形式简洁, 拟合速度快。

2.2. 远场发散角的近似测量

高斯光束的光斑半径 $\omega(z)$ 随传播距离 z 的变化规律为:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (3)$$

其中 ω_0 为束腰半径, 是光束直径最小的位置, z_R 为瑞利长度, 是从束腰位置到光束截面积扩大为束腰处两倍的距离。实际高斯光束在束腰附近近似于平行, 在远场近似为直线发散角 θ :

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (4)$$

假设光束在传播过程中像一个圆锥体, 其轮廓线是直线。则发散角可用下列公式进行测量:

$$\theta = 2 \times \arctan\left(\frac{D-d}{2L}\right) \quad (5)$$

其中, D 和 d 分别是圆锥体大端和小端的直径, L 是它们之间的长度。虽然对于高斯光束, 严格来说其边缘并不是完美的直线, 但在离束腰足够远的地方, 光束的发散趋近于一个固定值, 此时可以用直线近似。测出发散角, 结合已知的波长, 理论上可以反推出束腰的位置和大小。

3. 技术方案

3.1. 系统模块设计

在有限的小空间内, 本文通过精心的设计与构建, 成功实施激光光束束腰的测量以及光斑质量的判断, 并精确识别发散角。这种小空间内的测量和调整策略, 不仅确保了光束质量的准确性, 还提供了优化的可能性。通过合理调整小空间内的光学元件和测量系统, 实现对光束束腰的精确控制, 优化光斑质量, 并有效降低光束的发散角。这一过程不仅展示了小型化技术在光学测量与调控领域的独特优势, 也为激光系统的性能提升和应用拓展提供了有力支持。

首先, 监测系统采用了模块化设计, 使得光源模块与监测模块相互独立。这种设计提高了系统的灵活性和可维护性, 使用者可以根据需求轻松更换或升级各个模块。同时, 由于模块之间不需要紧密连接,

系统的可移动性也得到了显著提升，便于使用者在不同环境和场景中进行测试。

其次，独立的模块化设计还使得检测系统具有高度的便携性。使用者可以根据需要方便地拆卸和组装系统，便于携带和移动。这种设计不仅简化了测试前的准备和测试后的整理工作，还提高了测试的效率和便利性。使用者可以随时随地进行测试，无需担心光源和检测模块之间的连接问题。

在光源的选择上，选用单束激光射入光路，单束激光产生的是单一波长和模式的光，这使得光束质量比较高，具有良好的方向性和相干性，有利于精确控制光束能量分布和位置，保证光屏上所形成的光斑质量达到要求。采用 16 mm 焦距的摄像机放置在光屏后方至少 32 mm 处放置摄像头以确保光屏上所形成的光斑质量达到要求。

选择恰当的半透半反透镜(Beam Splitter) (见图 1)与反射镜(Mirror) (见图 2)，以实现在光屏上形成两个具有显著光程差(Optical Path Difference, OPD)的焦点。半透半反透镜的选择需基于其特定的透射与反射比率，以及对特定波长光线的响应特性应具备高度均匀的膜层，以确保光线分束后的相位一致性。反射镜其表面镀层需具备高反射率与低色散特性，以减少光程差引入的额外相位偏移。在光路设计中，通过安排半透半反透镜与反射镜的位置与角度，可以调控两条光路的相对长度，从而产生所需的光程差。这一过程通过复杂的数学计算与光学仿真，以精确预测光线的传播轨迹与最终的干涉效果。最终，当光线经过精心设计的光路后，它们将在光屏上汇聚，形成两个具有不同光程差的亮点。这些亮点之间的距离与强度差异，直观地反映了光程差的大小，为后续的干涉测量、光学成像或其他精密光学实验提供了基础。

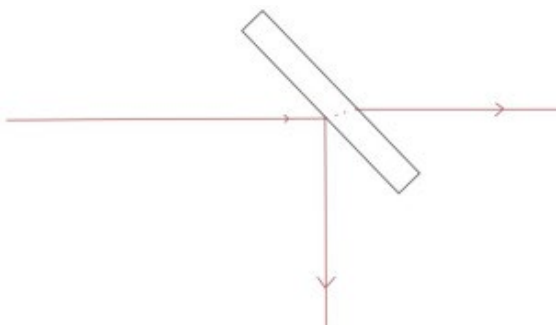


Figure 1. The working principle of the semi-transmissive and semi-reflective mirror

图 1. 半透半反镜工作原理

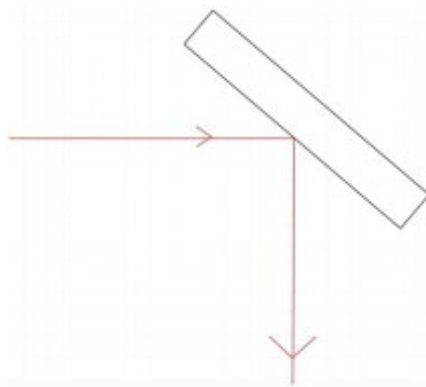


Figure 2. The working principle of the reflector

图 2. 反射镜工作原理

该光路系统(见图 3)由反射镜、半透半反透镜、光屏和摄像机组成,单束激光射入后,进入折射和反射两个功能区域。在折射区中,半透半反透镜负责将部分入射激光直接聚焦至光屏上,形成第一个光斑;而反射区则利用透镜内嵌的反射面或特殊涂层,将另一部分光线按特定角度反射至反射镜,再反射到光屏,从而形成两个光斑。

在系统集成和校准阶段,采用了先进的光学测量与调校技术,以确保光学组件(如反射镜、半透半反透镜和红外摄像机)被精确安置并调整至最佳位置。通过计算折返透镜的焦距和成像公式,准确定位光屏与摄像机之间的距离,以最大化成像的清晰度、对比度和稳定性。此外,对摄像机参数(如曝光时间、增益和白平衡)进行精细调整,以确保摄像机能够准确捕捉和记录光屏上的光斑图像。

最终,通过上述专业的设计与搭建流程,成功完成了该光路系统仿真图(见图 3,图中包括:半透半反镜 1、反射镜 2、反射镜 3、毛玻璃接收屏 4、视场范围 5、水平仪 6、摄像头 7),具体参数见表 1,原型的构建(见图 4),该系统不仅实现了激光光束的高效转换与双光斑成像,还展现出了极高的成像质量和稳定性,为后续的科学实验、工业检测或实验分析提供了强有力的技术支持。

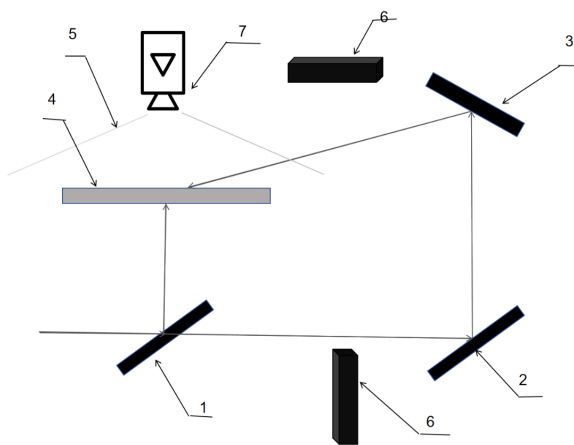


Figure 3. Simulation optical path diagram
图 3. 仿真光路图

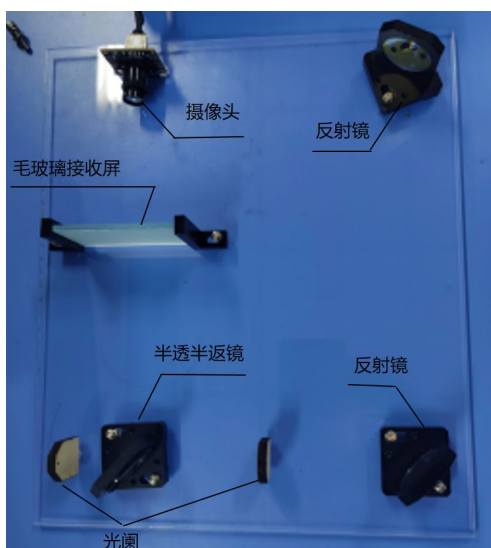


Figure 4. The optical path set-up diagram
图 4. 搭建光路图

Table 1. Component parameter table

表 1. 元件参数表

类别	元件/参数	规格详情
镜头(ZWAK-M12W026-5MP)	型号	ZWAK-M12W026-5MP
	焦距	2.6 mm
	接口	M12 × 0.5
	通光孔径	F2.4
	像面尺寸	1/2.5"
	视场角	D: 120°/H: 105°/V: 77°
	畸变	≤0.5%
	后焦距	3.8 ± 0.5 mm
	工作温度	-10°C~+70°C
	光学特性	支持近红外 IR (1064 nm 红外、窄带 1064 nm)
外形尺寸	φ14 × 12.8 mm	
平面反射镜	类型	前表面近红外高反平面反射镜
	尺寸	36 mm × 25 mm
	厚度	1.1 mm
	反射波段	1000 nm~1100 nm 近红外高反射
	反射面	第一表面(前表面)镀红外高反膜, 无二次折射误差
半透半反镜	类型	分光镜(半透半反)
	尺寸	86 mm × 86 mm
	分光比	50:50 (透射:反射, 适配激光校准光路)
	工作波段	1000 nm~1100 nm
	基底材料	K9 光学玻璃
	镀膜	近红外专用分光镀膜

3.2. 光斑图像处理

图像处理部分从红外摄像头采集到的光斑图像入手, 将图像转换为 float 类型保证计算精度, 通过三通道平均值法进行灰度化处理, 将其转换为灰度图像。在此基础上, 提取图像的空间尺寸信息, 创建与图像尺寸相同的网格坐标系, 构建起一个二维的网格结构, 计算每个像素点到图像原点(0, 0)的欧几里得距离作为强度坐标。接下来, 对图像中的每个像素点进行强度值的计算, 作为后续的基础数据。

为了对光斑的强度分布进行建模, 定义了一个高斯分布函数 $f(r) = a \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$ 。将二维数组展平为一维以便拟合, 采用非线性拟合算法, 通过最小化观测数据与理论模型之间的残差平方和, 来优化高斯分布函数的参数。这一过程帮助我们能够找到最佳拟合参数, 提供参数的协方差矩阵。获得最优参数后, 利用这些参数生成一个与原始图像相匹配的高斯曲线模型。最后, 绘制填充等高线图并添加颜色条映射显示灰度图像的分布情况, 绘制出拟合的高斯曲线和原始数据的散点图。

在初步获得高斯曲线模型后，识别到了曲线存在的切顶现象。为了进一步提升模型的准确性和鲁棒性，采取了一系列精密的图像处理与数据分析措施。首先，运用 OpenCV 对图像进行预处理，读取灰度图像，并借助 Otsu 阈值方法，对图像进行阈值分割，实现了图像的自动二值化。随后，引入形态学图像处理技术中的开运算操作，通过先腐蚀后膨胀两个步骤，有效地去除图像中的噪声和小型不相关物体，净化图像，提高后续分析的质量。

在图像质量得到优化后，通过寻找图像中的最大强度点确定光斑中心位置，在光斑中心所在行提取水平方向的光强分布数据。利用 SciPy 库中的 `curve_fit` 函数，根据标准高斯函数模型，对这些数据点进行非线性最小二乘拟合，振幅 a 取最大强度，均值 μ 取光斑中心位置，标准值 σ 初始设为 10，最终得到光斑经过阈值分割的二值化图像与拟合后的高斯曲线(见图 5)。

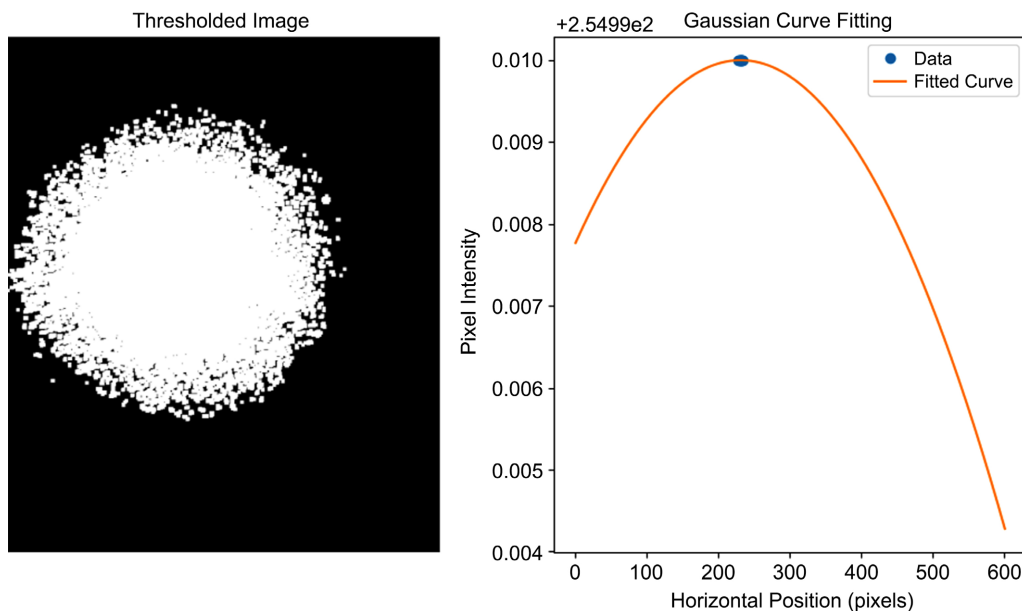


Figure 5. Spot threshold image and its Gaussian fitting curve
图 5. 光斑阈值图像及其高斯拟合曲线

在成功拟合出高斯曲线之后，进一步深入分析光斑的物理特性。首先基于高斯光束的直径定义，使用 sympy 求解高斯方程，找到高斯曲线上亮度达到峰值的 $\frac{1}{e}$ 处的两点，将这两个关键点的横坐标从像素单位转换为毫米单位。随后，将这两个转换后的横坐标值相减，得到了光斑的直径，可以求出两个光斑的直径。

在获得了两个不同位置的光斑直径以及它们之间的光程差数据后，便可以来计算激光光束的发散角，评价激光束的发散特性。

3.3. 人机交互界面

在人机交互界面开发环节，首先使用 Qt 的 `QCamera` 和 `QCameraImageCapture` 类来捕获激光光斑的图像。这通常涉及初始化相机设备，设置捕获参数(分辨率和帧率)，并触发图像捕获，将摄像机所获取的图像传入系统完成图像捕捉。然后使用 QT 图像的图像处理功能活着集成 OpenCV 库来进行图像预处理，使用 `QImage::convertToFormat()` 函数将图片转为灰度图，使用 Canny 边缘检测算法来定位光斑的边界完成图像处理。从而方便应用阈值分割来分离激光光斑和背景，使用 OpenCV 的 `findContours` 函数进行轮

廓检测找到光斑的轮廓。

对图像捕捉处理和特征处理后可以确定光斑的轮廓，所以可以根据光斑的轮廓计算光斑的最小外接矩形或圆形，从而得出光斑的直径。利用光斑中心点和光斑边界点之间的距离，结合已知的物理距离，可以计算发散角。通过比较不同距离处的光斑直径来估计发散角。确认计算方法后用 Qt 的界面组件，如 QLabel 或 QGraphicsView，来显示处理后的图像和计算结果。也可以使用 QFile 和 QTextStream 来记录计算结果到文件。

4. 结论

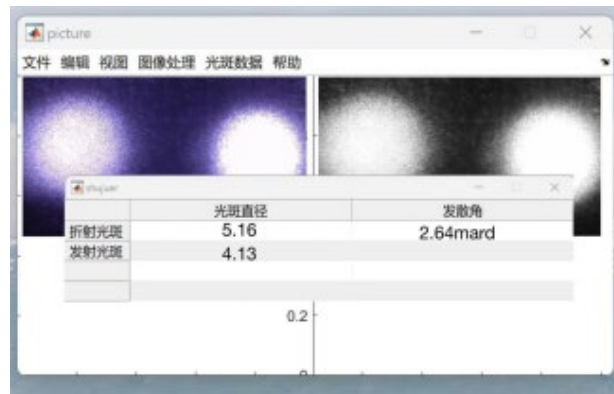


Figure 6. Light spot data processing interface

图 6. 光斑数据处理界面

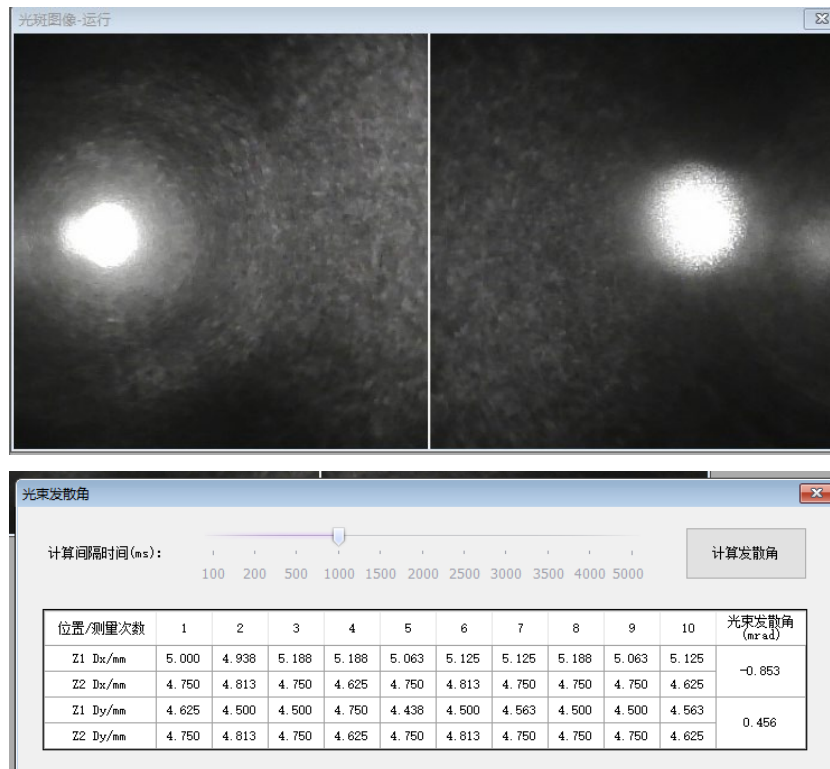


Figure 7. Experimental equipment measurement results

图 7. 实验设备测量结果图

本文设计的模块化光束质量检测系统能够实现较高精度的测量。以图 6 为例, 基于上述方法获取近场与远场光斑数据, 结合已知光程差计算得出光束发散角为 2.64 mrad, 表明系统已基本具备光束质量检测功能。图 7 为实验室脉冲激光实验设备测得的发散角数据。该实验设备分别在 X 轴和 Y 轴上测得光束发散角数据。

致 谢

本项目受国家级大学生创新创业训练计划资助(项目编号: 202410066003)。

参考文献

- [1] 冯飞, 戴晔, 钱滨, 邱建荣, 孙盛芝. 水导激光加工中激光参数的影响及其在精密制造中的应用(特邀) [J]. 中国激光, 2025, 52(14): 105-121.
- [2] 杜梓冰. 基于美国国防预算的激光武器布局与发展研究[J]. 火力与指挥控制, 2025, 50(3): 1-8.
- [3] 程智, 董登峰, 李洋, 等. 激光跟踪仪主动对准式复合传感高精度姿态测量[J]. 光学精密工程, 2025, 33(7): 1007-1018.
- [4] 张益嘉, 付鑫鹏, 阮迪, 等. 固体 MOPA 激光器光束质量优化技术研究进展[J]. 发光学报, 2025, 46(10): 1916-1929.
- [5] 阮鹏, 汪玉海, 潘其坤, 等. 内腔式非稳腔 DF 激光光束质量研究[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(5): 1068-1074.
- [6] 赵庆浩, 辛迪, 宫凯, 等. 976 nm 高光束质量窄线宽外腔半导体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(15): 365-371.
- [7] 李炎冰, 陈洪亮, 于鑫. 一种便携式光轴检测设备[J]. 电子测试, 2021(24): 26-27+121.
- [8] 梁明, 谷开慧, 孙晓冰. 基于 CCD 对高斯光束进行实时判断及特性参数的测量[J]. 大学物理实验, 2015, 28(1): 9-13.