

一种大功率宽波段激光束散角的校准测试方法

段园园 吉晓 阴万宏 于东钰 张金玉 张彪 宋一兵 黎高平

Calibration method for high-power and wide-band laser beam divergence angle

DUAN Yuanyuan, JI Xiao, YIN Wanhong, YU Dongyu, ZHANG Jinyu, ZHANG Biao, SONG Yibing, LI Gaoping

引用本文:

段园园, 吉晓, 阴万宏, 等. 一种大功率宽波段激光束散角的校准测试方法[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 450–455. DOI: 10.5768/JAO202344.0207004

DUAN Yuanyuan, JI Xiao, YIN Wanhong, et al. Calibration method for high-power and wide-band laser beam divergence angle[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 450–455. DOI: 10.5768/JAO202344.0207004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0207004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

镜面瑕疵对激光光束质量的影响

Effect of mirror defect on laser beam quality

应用光学. 2017, 38(4): 665–669 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407002>

基于动态核主元分析的大功率LED阵列动态光源在线状态观测与故障诊断

On-line state observation and fault diagnosis of high-power LED array dynamic light source based on dynamic kernel principal component analysis

应用光学. 2021, 42(4): 728–734 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403006>

热透镜控制激光光束质量技术研究

Controlling technique of beam quality by thermal lensing

应用光学. 2017, 38(1): 120–125 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0107001>

多光束激光相干成像孔径偏差对成像质量影响

Research on distribution of aperture position error in multi-beam coherent imaging and its impact on image quality

应用光学. 2019, 40(3): 411–415 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0302001>

空间旋转多光轴平行性校准技术

Spatial rotation multi-axis parallelism adjustment and calibration technology

应用光学. 2018, 39(5): 627–632 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501006>

太赫兹源发散角测量技术研究

Research on divergence angle measurement technique of terahertz sources

应用光学. 2021, 42(3): 499–503 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0303001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 02-0450-06

一种大功率宽波段激光束散角的校准测试方法

段园园¹, 吉晓¹, 阴万宏¹, 于东钰¹, 张金玉², 张彪¹, 宋一兵¹, 黎高平¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 在大功率激光系统的评价与分析中, 激光器的光束品质是系统光束品质的决定性因素, 也是激光器验收、鉴定的重要指标, 其中束散角是判别激光光束质量的重要参数。本系统测试激光波长的范围比较宽, 一般在 $0.532\ \mu\text{m}\sim 10.6\ \mu\text{m}$ 之间, 没有合适的探测器能够覆盖整个波段, 所以采用了一种新的方法来解决宽波段束散角的测量问题。选用 CCD 成像和扫描狭缝相结合的方法来实现宽波段激光光束束散角的测量, 可见光和近红外波段 ($0.532\ \mu\text{m}\sim 1.2\ \mu\text{m}$) 激光光束采用 CCD 法测量激光束散角, 中红外波段 ($1.2\ \mu\text{m}\sim 10.6\ \mu\text{m}$) 激光光束采用扫描狭缝法测量激光束散角。两种方法的结合可以较为精确地测量出不同波段的激光束散角。

关键词: 大功率激光; 光束品质; 激光束散角; 扫描狭缝; CCD 成像

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0207004

Calibration method for high-power and wide-band laser beam divergence angle

DUAN Yuanyuan¹, JI Xiao¹, YIN Wanhong¹, YU Dongyu¹, ZHANG Jinyu², ZHANG Biao¹,
SONG Yibing¹, LI Gaoping¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the evaluation and analysis of high-power laser system, the beam quality of laser is the decisive factor of the system beam quality and also an important index of acceptance and appraisal of laser, among which the beam divergence angle is an important parameter to identify the laser beam quality. The range of laser wavelength tested in this system is relatively wide, generally between $0.532\ \mu\text{m}\sim 10.6\ \mu\text{m}$, and no suitable detector can cover the whole band. Therefore, a new method was adopted to solve the measurement problem of wide-band beam divergence angle. The method of combining charge coupled device (CCD) imaging and scanning slit was used to measure the wide-band beam divergence angle. The CCD method was used to measure the laser beam divergence angle in visible and near-infrared band ($0.532\ \mu\text{m}\sim 1.2\ \mu\text{m}$), and the scanning slit method was used to measure the laser beam divergence angle in mid-infrared band ($1.2\ \mu\text{m}\sim 10.6\ \mu\text{m}$). The combination of the two methods can accurately measure the laser beam divergence angle in different wavebands.

Key words: high-power laser; beam quality; laser beam divergence angle; scanning slit; CCD imaging

引言

随着大功率激光的应用日益广泛, 对于光束质量的要求也随之提高^[1], 目前有激光束散角、聚焦光斑尺寸和 M^2 因子等因素来评价光束质量^[2]。其中激光束散角^[3]是评价大功率激光质量的重要参数之一, 它不仅能够反映出激光传输的发散特性

和传输质量, 还能评估出各种激光仪器的品质^[4]。

很多专家都对激光束散角的测量方法进行了研究。驻扬州地区军事代表室许辉等提出了一种出射激光束散角的数字化检测方法^[5], 该方法是通过 CCD 采集激光光斑中心, 然后根据光斑半径计算得出激光束散角; 天津大学肖青等研究了相机

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 技术基础科研项目 (2Q2020YQ208008)

作者简介: 段园园 (1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事激光测试技术研究。E-mail: dyylsb@126.com

参数对测量误差的影响^[6]; 电子科技大学朱建坤和长春理工大学刘冰的毕业论文主要研究一种基于图像融合的激光束散角测量^[7-8], 将欠饱和和过饱和图像进行融合, 并进行束散角的计算; 长春理工大学申琳等也是用图像融合的方法进行束散角测量^[9]; 长春理工大学李晓晶等提出了一种不装衰减片的测量激光束散角的新型方法, 用 CCD 两次拍下光斑通过 MATLAB 图像处理获得光斑半径, 计算得到束散角大小^[10]; 长春理工大学杨进华等也是通过 MATLAB 图像处理软件计算束散角大小^[11]; 军械工程学院李刚等提出了一种出射激光束散角的数字化检测方法。

通过对上述方法的研究, 结合本系统测试激光束散角波长范围($0.532\ \mu\text{m}\sim 10.6\ \mu\text{m}$)比较宽的特点, 发现没有合适的探测器能够覆盖整个波段。所以本文提出一种 CCD 成像和扫描狭缝相结合的新方法来实现宽波段激光光束束散角的测量, 采用该方法可以较为精确地测量出不同波段的激光束散角。

1 系统组成

大功率宽波段激光束散角测试系统校准装置采用 CCD 法结合狭缝扫描法对激光束散角进行测试, 如图 1 所示, 该测试校准装置主要由束散角测试探头和数据采集处理显示主机两部分构成。

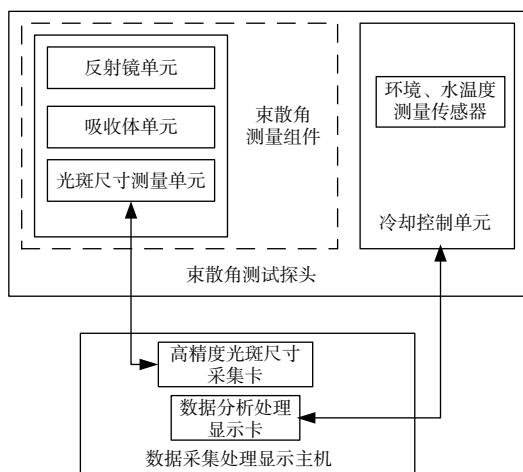


图 1 大功率宽波段激光束散角测试系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of composition of high-power and wide-band laser beam divergence angle test system

1) 束散角测试探头

大功率宽波段激光束散角测试系统束散角测试探头由离轴反射镜、楔形分束镜组、吸收体组、

显微放大系统、CCD/狭缝扫描系统、数据输入/输出接口及外壳等构成, 用于波长范围为 $0.532\ \mu\text{m}\sim 10.6\ \mu\text{m}$ 、束散角范围为 $0.05\ \text{mrad}\sim 5\ \text{mrad}$ 的激光束散角测量。

2) 数据采集处理显示主机

大功率宽波段激光束散角测试系统数据采集处理显示主机主要完成对光束光斑数据的采集、处理、显示等功能, 完成人机交互。

采用 CCD 法及狭缝扫描测量大功率激光聚焦光斑大小及占空比, 通过计算机及处理软件得到激光光束束散角参数。

2 测试方法及关键技术

2.1 大口径大功率激光束散角测量原理

面阵 CCD 法对于光束的实际相对空间分布可以准确获得, 所以更适合用于对近红外大功率激光束散角的测量, 响应速度大于 $100\ \text{Hz}$ 。但由于 CCD 的响应波段不能覆盖由可见光至远红外的波段范围($0.532\ \mu\text{m}\sim 10.6\ \mu\text{m}$), 为解决上述矛盾, 本文选用 CCD 对可见光至近红外波段的聚焦激光光斑进行测量, 中红外波段至远红外波段则采用狭缝扫描的方法对聚焦激光光斑进行测量。

待测激光束通过衰减器后, 经聚焦透镜汇聚, 到达透镜焦平面的 CCD 靶面上, CCD 测量得到照射 CCD 靶面上的光斑大小, 除以聚焦透镜的焦距, 就能得到激光发散角^[12], 如图 2 所示。

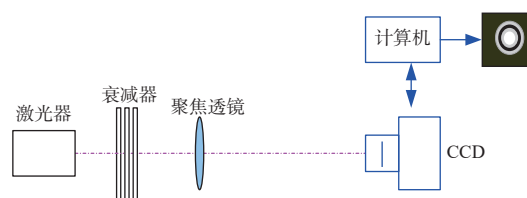


图 2 大功率宽波段激光束散角测试系统测量原理图

Fig. 2 Measuring principle diagram of high-power and wide-band laser beam divergence angle test system

2.2 可见近红外 CCD 法

CCD 法^[13]主要完成对可见光至近红外波段的光斑大小的采集。采用离轴反射镜作为聚焦系统的主镜, 其焦距为 f 。三块楔形反射镜对大功率激光光束进行反射, 目的是压缩测量探头的体积并增加对入射激光的衰减量, 保证入射到 CCD 靶面时满足 CCD 探测器的损伤阈值要求, 使得 CCD 工作在线性区域。光斑经显微放大系统(放大倍数为 N)放大后, 入射到 CCD 靶面上, 从而能够精确

地计算得到 CCD 靶面上光斑的尺寸 d 。通过数据处理显示单元,可计算得到激光光束的束散角^[3]:

$$\theta = d/N/f \quad (1)$$

大功率激光束散角测试系统的核心部件为 CCD 相机,它的性能决定着测量系统的精度,所以 CCD 的选择直接影响测量精度,对于 CCD 相机的选择主要从以下三个方面考虑。

1) 高分辨率

识别图像轮廓的能力主要靠 CCD 相机的分辨率,它的能力越强,识别图像轮廓的精度就越高,这就需要有足够多像元的 CCD 相机来实现。

2) 低噪声

图像的细微轮廓主要由 CCD 噪声影响,主要考虑 CCD 的热噪声暗电流等,要选择 CCD 噪声低、暗电流小的型号,同时后期软件也可以消除一定的背景噪声。

3) 宽动态范围

线性响应的噪声电平和最大信号电平决定了 CCD 相机的动态范围。CCD 的像素越多,分辨率越高,但也导致了存储的最大电荷量的减少,从而使动态范围变小,所以在 CCD 的选择上要考虑上述指标。

2.3 中、长波红外扫描狭缝法

扫描狭缝法具有高于 $0.01 \mu\text{m}$ 量级的空间采样分辨率,可以精确测量接近衍射极限的激光光束束散角。由于其采用单元探测器进行信号探测,通过更换合适的探测器,测量波长范围可以覆盖从中红外到远红外波段,并且可以直接测量较大功率范围的激光束散角。但其仅能得到光束相对狭缝垂直方向的光束空间功率分布情况,只适合于测量连续或者高重频脉冲激光。扫描狭缝法测量原理^[14]如图 3 所示。

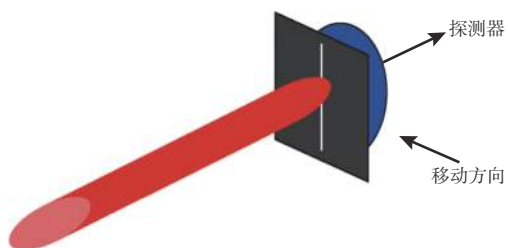


图 3 扫描狭缝法测量激光光束束散角原理图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring laser beam divergence angle by scanning slit method

扫描狭缝法是被测光斑不动,利用狭缝在被测光斑上移动,从而对光斑上不同位置的光强度进

行测量,得到光斑的空间分布信息。可以计算得到光斑大小、束宽、重心、发散角和空间分布等光束参数。

本项目采用旋转的滚轮式 30° 、 75° 、 120° 、 165° 双正交四狭缝扫描测量方案,其原理如图 4 所示。

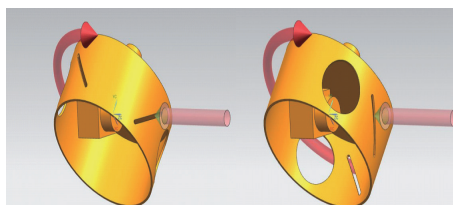


图 4 旋转滚轮式双正交四狭缝扫描测量方案原理图

Fig. 4 Schematic diagram of scanning measurement scheme of rotary roller type biorthogonal four slit

两对狭缝正交分布于滚轮的侧面,其方向与滚轮的边缘形成一定的角度,探测器固定在滚轮的内部,不随滚轮转动。当滚轮围绕着中心旋转时,两对正交狭缝从垂直方向轮流切割被测光束,对光束进行扫描测量。狭缝扫描到的光在探测器上产生电流信号,其电流值的大小与狭缝通过的光的通量成正比。系统中的高精度数字编码器精确定位切割狭缝的位置,得到狭缝的位置变化信息和测量得到电流量信息的相对对应变化关系。这些信息经过测量探头内部的数字信号处理器处理后可以获得被测量光束沿着四个正交狭缝方向的光强分布情况,通过对四个方向的测量数据进行计算处理,可以获得测量位置处的光斑空间分布、光斑大小、束散角和束宽等信息。

基于扫描狭缝的大功率激光束散角测试系统在进行激光束散角测量时,将高精度扫描狭缝探头放置于聚焦光学系统的焦平面位置处,根据四个狭缝获得的光斑空间分布信息可以获得光束束宽等信息,再根据聚焦系统的焦距,可以计算出激光光束的发散角。

3 实验及数据处理

在采用面阵 CCD 进行光束束散角、空间分布、质心及指向稳定性测量时,由于 CCD 分辨率不够高,无法满足高精度测量的需求,因此需要对 CCD 采集到的图像进行亚像素处理。

由图像采集卡将 CCD 摄像机拍到的图像转化为数字信号(即将 CCD 截取到的光斑经 AD 转换)并进行存储,采集后的光斑经图像采集卡,送入计

算机。采用图像处理技术对图像进行必要的预处理, 主要是灰度化、二值化、滤除噪声、进行图像平滑处理和图像灰度校准; 再对经过预处理后的数字图像信号的有效部分进行分析和处理。为进一步增强图像质量, 需要采用中值滤波法进行图像处理, 降低噪声。但要控制滤波次数, 防止光斑基本形状发生变化, 从而影响中心位置的改变。

光斑束宽信息影响激光光束质量的测量精度, 激光光斑质心探测的精度又决定了光斑束宽的测量, 所以对光斑质心和束宽处理算法的研究直接影响激光光束测量的精度^[15]。

光束质心的计算是该装置的技术关键之一, 设在沿光轴方向的某一位置 z 处, 测量得到某时刻光束截面功率密度分布为 $I(x, y, z, t)$, 则功率密度分布 $I(x, y, z, t)$ 的一阶矩给出了光束分布的质心位置坐标 $(x(t), y(t))$:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} xI(x, y, z, t) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z, t) dx dy} \\ y(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} yI(x, y, z, t) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z, t) dx dy} \end{cases} \quad (2)$$

通过不同时刻光斑质心位置坐标 $(x(t), y(t))$, 一段时间内光斑平均中心为 (x_0, y_0) , 计算得到不同时刻光束漂移:

$$\Delta\theta(t) = \frac{(x(t) - x_0)^2 + (y(t) - y_0)^2}{f} \quad (3)$$

通过式(3)可得到光束指向稳定性 $f_{\text{RMS}}(\Delta\theta(t))$ 。不同 x 、 y 方向的光斑尺寸 ω_x 、 ω_y 由功率密度分布 $I(x, y, z)$ 的二阶矩给出:

$$\begin{cases} w_x^2 = \frac{4 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) dx dy} \\ w_y^2 = \frac{4 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \bar{y})^2 I(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, z) dx dy} \end{cases} \quad (4)$$

以上积分看似是对 XY 的平面进行积分, 其实是捕获了光功率 99% 以上的区域。这种图像处理方法的精度可达到 $\text{Pixel}/10 \sim \text{Pixel}/4$ 。

根据所测光束宽度 X 和光束宽度 Y 求出束散角, 测试结果如图 5 所示。

$$\begin{cases} \theta_x = \frac{d_x}{f} = \frac{3.1826}{2} = 1.591 \text{ mrad} \\ \theta_y = \frac{d_y}{f} = \frac{3.1633}{2} = 1.582 \text{ mrad} \end{cases} \quad (5)$$

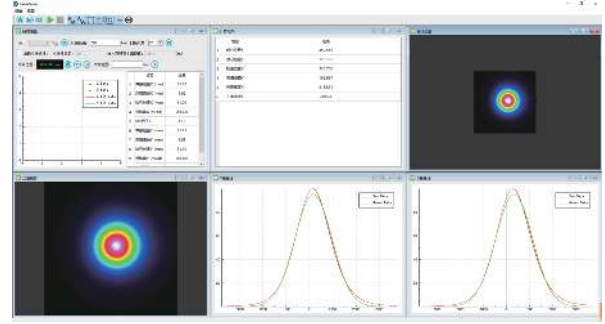


图 5 测试结果图

Fig. 5 Diagram of test results

4 大口径高能激光束散角校准原理

采用光源与分束镜相结合的方法实现大功率激光光束束散角的校准。大功率激光光束束散角标准装置由光源、标准发散角测量仪、高性能楔形分束镜等部件组成, 其中高性能楔形分束镜由德国贺利士石英玻璃及硒化锌加工而成, 可完成对近红外及中波红外激光波长范围的光束质量测量仪校准。采用不镀膜的分束镜 1, 100 W~100 kW 大功率激光到达激光光束质量测量设备的激光功率约为 3 W~3 kW, 校准原理如图 6 所示。

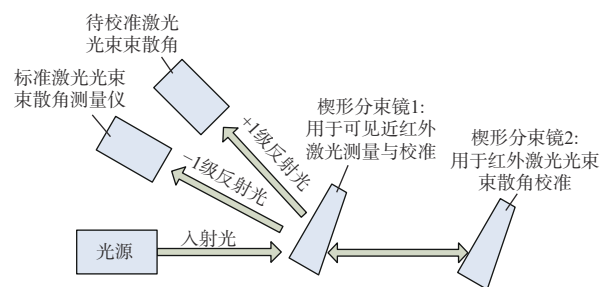


图 6 激光光束束散角校准原理图

Fig. 6 Schematic diagram of calibration for laser beam divergence angle

由标准光源发出的光束经过分束镜分束后, -1 级(前表面反射光)由标准激光束散角测量反射光束的发散角 θ_s , +1 级(后表面反射光)由待校准激光光束发散角测量仪测量光束发散角 θ_T , 从而得到发散角测量仪的修正系数或示值误差:

$$C = \frac{\theta_s}{\theta_T} \text{ 或 } \Delta = \theta_T - \theta_s \quad (6)$$

5 结论

考虑到被测激光波长范围($0.532 \mu\text{m} \sim 10.6 \mu\text{m}$)较宽的特殊性, 覆盖了可见光、近红外和中红外波

段,很难找到能够覆盖整个波段的 CCD,故提出了一种 CCD 成像和扫描狭缝相结合的方法来测试宽波段激光束散角。选取高精度面阵 CCD 和可以精确测量接近衍射极限的激光光束束散角的扫描狭缝法相结合,通过实际测试,该方法可以分别提高每一个波段激光束散角测量精度,从而可以更好地反映出大功率激光的光束质量,也可以大大提高大功率光纤激光等领域对激光光束质量 β 因子/BQ 因子测量仪的量值精度要求。

参考文献:

- [1] 杨治平,黎高平,杨斌,等.现场激光能量计量技术的研究[J].*应用光学*,2007,28(4):508-512.
YANG Yeping, LI Gaoping, YANG Bin, et al. Application of in situ laser energy metrology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(4): 508-512.
- [2] 吉晓,杨鸿儒,刘国荣.激光光束质量参数测量方法的研究[J].*应用光学*,2006,27(增刊1):51-54.
JI XIAO, YANG Hongru, LIU Guorong. Study on measurement method of laser beam quality parameter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(S1): 51-54.
- [3] 李元,杨华梅,孙婷.基于Isight的激光束散角快速计算方法[J].*应用光学*,2010,31(5):825-827.
LI Yuan, YANG Huamei, SUN Ting. Fast calculation of laser divergence angle based on Isight[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 825-827.
- [4] 杨爱粉,李刚,王亮,等.激光综合应用系统分析[J].*应用光学*,2016,37(3):476-481.
YANG Aifen, LI Gang, WANG Liang, et al. Analysis on laser comprehensive application systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(3): 476-481.
- [5] 许辉,李刚,徐榕,等.激光照射指示器束散角数字化检测方法研究[J].*军械工程学院学报*,2004,16(2):46-48.
XU Hui, LI Gang, XU Rong, et al. Study on digital method of measuring laser diverging angle from irradiator[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2004, 16(2): 46-48.
- [6] 肖青,刘侠,邓剑钦,等.基于相机式激光光束参数测量精度的影响因素分析[J].*激光与光电子学进展*,2018,55(7):308-313.
XIAO Qing, LIU Xia, DENG Jianqin, et al. Analysis of the influence factors on high precision measurement of laser beam parameter based on camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 308-313.
- [7] 朱建坤.基于图像融合的激光束散角测量及硬件实现[D].成都:电子科技大学,2015.
ZHU Jiankun. Hardware implemented on laser beam divergence angle measurement based on image fusion[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [8] 刘冰.军用强激光器束散角和能量密度参数测试研究[D].长春:长春理工大学,2012.
LIU Bing. Military strong laser beam parameters test research of divergence angle and energy density[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [9] 申琳,杨进华,韩福利,等.基于光斑图像的激光束散角测量方法研究[J].*兵工学报*,2011,32(7):890-895.
SHEN Lin, YANG Jinhua, HAN Fuli, et al. Research on laser beam divergence angle measurement method based on spot image[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(7): 890-895.
- [10] 李晓晶,安志勇,肖作江,等.基于CCD二次成像法的激光束散角测量方法研究[J].*长春理工大学学报(自然科学版)*,2010,33(4):50-51.
LI Xiaojing, AN Zhiyong, XIAO Zuojiang, et al. Study on measuring method of the laser divergence angle based on CCD second imagery[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(4): 50-51.
- [11] 杨进华,胡楠.光电法测试激光束散角研究[J].*长春理工大学学报(自然科学版)*,2009,32(4):527-530.
YANG Jinhua, HU Nan. Research of measuring divergence angle of laser beams by photoelectric method[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 32(4): 527-530.
- [12] 李刚,董伟,徐春梅,等.驾束制导仪激光束散角的数字化检测方法研究[J].*激光与红外*,2004,34(3):231-232.
LI Gang, DONG Wei, XU Chunmei, et al. Study on digital method to measure divergence angle of laser beam rider guidance[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(3): 231-232.
- [13] 王劲松,杨淑娟,刘红,等.可见近红外激光束散角检测系统研究[J].*科学技术与工程*,2012,12(6):1248-1250.
WANG Jinsong, YANG Shujuan, LIU Hong, et al. Detection

- tion system for divergence laser beams of visible and near infrared[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(6): 1248-1250.
- [14] 杨鸿儒, 吴磊, 史继芳, 等. 高能激光光束质量的测量[J]. *宇航计测技术*, 2007, 27(5): 48-51.
- YANG Hongru, WU Lei, SHI Jifang, et al. Beam quality measurement for high-energy lasers[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, 27(5): 48-51.
- [15] 向晓燕, 陈海清, 吴鹏, 等. 基于CCD的激光束宽自适应测量算法[J]. *激光技术*, 2006, 30(5): 552-554.
- XIANG Xiaoyan, CHEN Haiqing, WU Peng, et al. Adaptive measuring algorithm of laser beam width based on CCD[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 552-554.