

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0365-04

光束质量测试系统标定技术

田小强, 周文超, 彭 勇, 解 平, 胡晓阳

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 光束质量一直是表征激光束输出质量的重要参量, 测量方法有很多种。目前对于较强的带遮拦光束采用光束质量远场测试法。在光束传输效率领域内的应用中, 使用光束质量 β 因子来评判光束质量性能参量, 并通过 CCD 远场测试法测量得到。为了提高 CCD 远场法光束质量 β 因子测量系统的测试精度, 分析了系统中光学部件和数据采集、处理部件的关键参量, 针对不同的参量采用不同的标定方法分别对其进行标校。说明了实际使用的标校方法、分析测试系统的测量不确定度来源, 定量确定了测量不确定度的大小。标定技术的研究从理论上促进了测量方法的进步, 标校方法的应用有利于实际测试工作中测试结果准确度、可信度的提高。

关键词 测量; 光束质量 β 因子; CCD 远场测试法; 参量标定; 不确定度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

Calibration Technique of Light Beam Quality Measurement System

TIAN Xiao-qiang, ZHOU Wen-chao, PENG Yong, XIE Ping, HU Xiao-yang

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Beam quality is always an important parameter to value the output quality of laser beam, and many methods are developed. For high intensity laser beam with center obscuration, beam quality far field measurement method is used presently. The beam quality factor β is used to judge the performance parameters of the beam quality in the application of beam transport efficiency field, and it is obtained by CCD far field measurement. In order to advance measurement precision of the CCD far field beam quality factor β measurement system, the key parameters in optical elements and data collecting and processing courses are analyzed, and different calibration methods are used for different parameters. The calibration methods used in practice are explained, and the sources of the system measurement uncertainty are analyzed and determined quantitatively. The research of calibration methods promotes the advance of the measurement method, and the application of the calibration method benefits the improvement of the veracity and reliability of the measurement results in the practical measurement work.

Key words optical measurement; beam quality factor β ; CCD far field measurement method; parameter calibration; measurement uncertainty

1 引 言

光束质量一直是表征激光束输出质量的重要参量。在长距离能量输送应用中, 实际关心的是焦斑上的激光能量分布能否使尽量多的能量集中在应用所需的光“桶”尺度内^[1]。光束质量 β 因子^[2], 即包含与衍射极限光斑一倍衍射极限直径内同样的能量比条件下, 有像差系统的远场光斑的环围能量直径与衍射极限直径之比, 成为目前评价系统能量传输性能的重要参量^[3]。采用 CCD 远场测试法测量光束质量 β 因子, 说明系统重要参量的标定方法, 并分析系统测量不确定度。

2 光束质量 β 因子远场测试法

2.1 测试原理

光束质量远场测试法是把光束变换成远场光斑, 用 CCD 采集光斑图像, 测量光斑一定环围能量比内的光斑直径, 并与理想光束远场光斑相应的光斑直径相比, 得出光束质量因子 β 。对环围能量比的选取, 从理论上合理的说明是采用理想光束远场一倍衍射极限内环围能量比。光束质量 β 因子的计算公式为

$$\beta = d/d_0, \quad (1)$$

$$d = \alpha(d') \cdot d', \quad (2)$$

作者简介: 田小强(1975—), 男, 中国工程物理研究院应用电子学研究所助理研究员。主要从事光学检测技术的研究。

E-mail: cdtxq@163.com

式中 d_0 为理想光斑直径值, d' 为对采集得到的光斑按一定环围能量比计算所得光斑直径, $\alpha(d')$ 为修正系数, 是光斑直径的函数, 用于修正因 CCD 采集局限而导致的误差, d 为修正采集误差后的光斑直径值。

2.2 测试系统构成

光束质量测试系统用于测量远场聚焦激光光斑的光束宽度和相对光强分布等激光参量。测量系统包含等效长焦光学组件, CCD 探测器, 图像采集系统和计算软件。为得到高精度的测量结果, 需要对各个重要器件和参量进行标定。测试系统结构如图 1 所示。

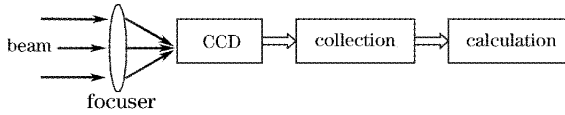


图 1 光束质量测量系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of beam quality measurement system

3 测量系统参量的标定内容

测量方法的关键在于: 测量系统对光束的变换准确度和对光斑的采集准确度; 对采集光斑能量统计及计算环围能量相应光斑大小的准确性。

由衍射原理可知, 测试系统等效焦距影响光束的远场变换准确度; 测试系统的分辨率、采集动态范围以及采集系统的响应均匀性, 在采集过程中影响光斑图像数据采集的完整性和真实性, 在计算中影响采集光斑能量统计及计算环围能量相应光斑大小的准确性。所以涉及标定的关键参量有: 1) 测试系统分辨率的标定; 2) 测试系统等效焦距的标定; 3) 数据采集系统采集动态范围的标定; 4) 数据采集系统响应均匀性的标定; 5) 修正系数的标定; 6) 数据处理算法的标定。

4 测量系统参量的标定方法

4.1 系统分辨率的标定方法

如图 2 所示, 在平行光路中垂直于光束放置光栅。理论上在 CCD 的光敏面上出现与狭缝方向垂直的干涉条纹, 相邻两条纹之间的间距为

$$\Delta y = \frac{r_0}{a} \lambda,$$

式中 a 为所用光栅的光栅常数, r_0 为狭缝到衍射图像的距离, 此时为透镜的焦距 f , λ 为平行光的波长。由实际采集到的图像上得出条纹间距 Δy 内的像素数 n_y , $\Delta y/n_y$ 即为 y 方向系统的分辨率。用同样的

方法可得出光束质量测试系统另一方向的系统分辨率。

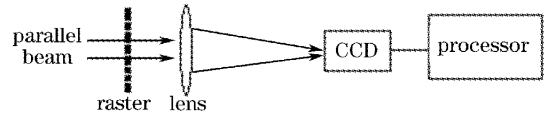


图 2 光束质量测试系统分辨率标定实验示意图

Fig. 2 Schematic of beam quality measurement system resolution calibration

分辨率不确定度为 r_0 和 a 的合成标准不确定度, 表示为

$$u_{\text{resolution}} = \sqrt{\frac{\lambda^2}{a^2 n^2} u_r^2 + \frac{r^2 \lambda^2}{a^4 n^2} u_a^2}, \quad (3)$$

4.2 系统等效焦距标定方法

如图 3 所示, 不同波长平行光经过一个光栅后入射到光束质量测量系统, 经成像透镜在 CCD 上形成光栅衍射图像, 对图像进行处理, 计算出各级衍射光斑间的距离 s , 即可得到光路对该波长激光的等效焦距 f 。

$$f = s \times a / (N\lambda), \quad (4)$$

式中 N 为所测量光斑间的衍射暗环数目。

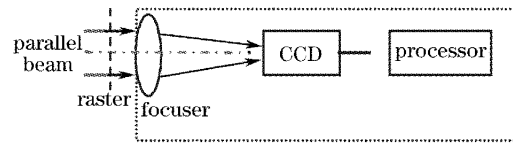


图 3 光束质量测量系统等效焦距标定光路示意图

Fig. 3 Schematic of beam quality measurement system equivalent focal length calibration

焦距标定不确定度为 a 与 s 的合成标准不确定度, 表示为

$$u_f = \sqrt{\frac{s^2}{N^2 \lambda^2} u_a^2 + \frac{a^2}{N^2 \lambda^2} u_s^2}, \quad (5)$$

4.3 数据采集系统采集动态范围标定的方法

按图 4 布置光路, 调节衰减器使到达探测器的光功率发生变化, 测量光功率和相对应的探测器输出峰值, 对线性区进行线性拟合。根据线性拟合线把非线性区数据校准至线性, 给出校准曲线, 以后用于光斑图像计算中。校准后用最大量程对应的校正

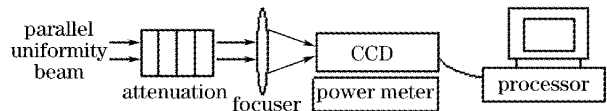


图 4 CCD 相机线性响应校准实验光路示意图

Fig. 4 Schematic of CCD linear response calibration

值与噪声的均值相比,得出采集动态范围

$$DR = 20 \lg(I_{\max}/I_{\text{noise}}).$$

4.4 CCD 相机响应均匀性标定方法

按图 5 布置光路,调节光强使响应幅值为动态范围的 1/2,采集数据,进行多帧平均,计算响应面上的响应峰谷值 PV 和均方根值 RMS,求出响应分布,作为校准系数用于数据处理中。

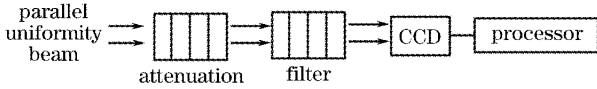


图 5 CCD 相机响应均匀性标校实验光路示意图

Fig. 5 Schematic of CCD response uniformity calibration

4.5 修正系数标定方法

同一环围能量比条件下,采用变遮拦比光束形成不同直径远场光斑,既光束口径不变,改变遮拦比大小。实际采集系统对其进行采集和计算,得出光斑直径测量值,与光斑理想值比较得出光斑直径测量的修正系数,作出修正系数曲线。修正系数表达式为

$$\alpha(d'_B) = d_B/d'_B, \quad (6)$$

d_B 为不同遮拦比光束理想衍射极限光斑直径, d'_B 为实际采集远场光斑一定环围功率比内的直径计算值。

4.6 数据处理算法的标定

采用套孔法对光斑尺寸计算准确度进行标定。

按图 6 布置光路,用 CCD 相机采集记录光斑图像。用功率计测量记录全光功率,放置小孔屏,使聚焦光斑中心通过小孔中心,换不同口径的小孔,分别测量透过光功率。根据不同口径小孔测量的能量比,计算用相机采集图像的同样环围能量比的光斑大小,与已知的小孔口径比较,进行算法校正。

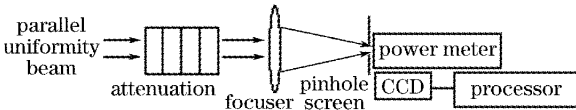


图 6 套孔法标定光斑尺寸计算准确度实验光路图

Fig. 6 Schematic of light spot size calculation accuracy calibration using pinhole method

5 测试不确定度分析

根据测量原理式(1),引起光束质量测试系统测量不确定度的因素主要是光斑直径测量的不确定度和理论光斑直径的标定不确定度^[4]。

理想光斑直径值通过校准的焦距和有效口径计算得出,计算公式为

$$d_0 = c \frac{f\lambda}{D}, \quad (7)$$

c 为衍射环系数, D 是光束有效口径, f 为等效焦距。理想光斑直径值的不确定度为:

$$u_{d_0} = \left(\frac{c\lambda}{D}\right) \sqrt{u_f^2 + \frac{f^2}{D^2} u_D^2}. \quad (8)$$

光斑直径测量不确定度是由系统分辨率、采集动态范围和光斑大小测量准确度形成的。由于是可直接进行测量的,采用 A 类不确定度评定方法,对标准光束远场光斑尺寸进行 n 次测量, $n \geq 10$,计算标准偏差表征测量不确定度,如下式

$$u_{d'} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d'_i - \bar{d}')^2}{n(n-1)}}, \quad (9)$$

d'_i 为测量值, \bar{d}' 为测量算术平均值。

光斑直径测量修正系数的不确定度与系统分辨率、采集动态范围不确定度有关,又由(6)式可知其归结于标定时光斑测量的不确定度 $u_{d'_B}$ 。修正系数的不确定度为

$$u_\alpha = \frac{d_B}{d'^2_B} u_{d'_B}. \quad (10)$$

修正后光斑直径的不确定度为

$$u_d = \sqrt{\alpha^2 u_{d'}^2 + d'^2 u_\alpha^2}. \quad (11)$$

综合以上因素,光束质量测量不确定度 u_β 为

$$u_\beta = \frac{1}{d_0} \sqrt{u_d^2 + \frac{d_0^2}{d_0^2} u_{d_0}^2}, \quad (12)$$

在实际测试条件下,焦距测量和光束有效口径测量的相对误差很小,不确定度较小,理论光斑直径不确定度 u_{d_0} 可以忽略不计。主要不确定度在于光斑尺寸测量不确定度。光束质量测量不确定度 u_β 可以简化为

$$u_\beta = \frac{\sqrt{\alpha^2 u_{d'}^2 + d'^2 u_\alpha^2}}{d_0}, \quad (13)$$

d_0 为理想光斑直径值, α 为光斑直径修正系数, d' 为计算光斑直径值。

6 结 论

本文介绍了 CCD 远场测试法测量光束质量 β 因子测量系统的各重要器件参量的标定方法,分析了测量不确定度。对光束质量测量工作具有指导意义,标校方法应用于实际测试工作中,提高了光束质量测量的准确度和可信度。

参 考 文 献

- 1 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality at a real high power laser on the target surface in far field [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 327~332
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素 [J]. *中国激光*, 1997, **A24**(4): 327~332
- 2 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004
苏毅, 万敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 3 Li Xinyang, Xian Hao, Wang Chunhong *et al.*. Relationship between beam quality factor β and wavefront error [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 798~802
李新阳, 鲜浩, 王春鸿等. 波像差与光束质量 β 因子的关系 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 798~802
- 4 Ye Depei. Basic Knowledge of Metrology [M]. Bureau of Technique Foundation of the Department of Electronic-Information of the Ministry of Genral Equipmen, 1999. 87~97
叶德培. 计量基础知识 [M]. 总装电子信息技术基础局, 1999. 87~97