

CCD 的非线性响应特性对光束质量测量的影响及修正

景文博¹, 张汝平², 王晓曼², 赵洁³, 杨世钰², 高洋洋²

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 长春理工大学 外国语学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 在利用电荷耦合器件 CCD 对激光光束质量测量的过程中, 通过对比不同的激光波长, 分析了 CCD 的光电响应非线性特性对光束质量 M^2 因子评价的影响。由于对未进行线性标定的 CCD 所测得的四种不同波长的激光器的光束束宽值相对比较大, 这会对激光光束质量的测量精度带来影响, 因此提出了一种新的基于面阵型光电探测器的光电响应标定方法。搭建基于 CCD 测量法的激光光束质量测量系统, 建立高斯型激光光束的近远场传输模型, 对激光束在传输方向上不同位置处的焦散廓形进行多次采样, 利用统计学方法得到 CCD 的光电响应线性区间。仿真和实验结果表明: 利用 CCD 光电响应特性的标定结果对图像进行非线性灰度修正, 对比国际标准激光光束质量分析仪, 所测得的激光光束质量 M^2 因子更加准确且相对误差降低了 2.36%。提出的方法可有效提高激光光束质量 M^2 因子的测量精度, 对于评价激光光束质量具有重要的应用价值。

关键词: 面阵 CCD; 非线性光电响应特性; 束宽; 光束质量; 线性标定

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0817004

Impact and correction of CCD nonlinear response on measurement of the laser beam quality

Jing Wenbo¹, Zhang Ruping², Wang Xiaoman², Zhao Jie³, Yang Shiyu², Gao Yangyang²

- (1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3. School of Foreign Languages, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In the process of measuring laser beam quality by using the CCD, the influence of nonlinear optoelectronic response of the CCD on the beam propagation ratios M^2 was analyzed in the paper through comparing the wavelength of different lasers. As the beam width values from four different wavelength lasers measured by non-linear calibrated CCD were relatively large, the measuring accuracy of laser beam quality will be affected to a certain extent. Therefore, a new calibration method of optoelectronic response based on the CCD will be put forward. By setting up a laser beam quality measurement system based on CCD measurement and building the near-field and far-field transmission model of Gaussian laser beam as well as multiple sampling from laser beams' caustic profile in different positions of a certain transmission

收稿日期: 2016-12-05; 修订日期: 2017-01-15

基金项目: 吉林省科技厅重点科技攻关项目(20160204009GX)

作者简介: 景文博(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事大气激光通信、图像处理方面的研究。Email: wenbojing@sina.com

direction, the photoelectric response linear range can be obtained with statistical methods. The result of simulation and experiment shows that by using the optoelectronic response character's calibration result of the CCD to make nonlinear gray level restoration on images, the laser beam quality factor M^2 can be measured more accurately and the relative error can be decreased by 2.36% compared with the measuring result by the international standard laser beam profiler. The method mentioned in the paper can effectively increase the measuring accuracy of the laser beam quality factor M^2 and it has great application values on evaluating the laser beam quality.

Key words: CCD; nonlinear optoelectronic response; beam width; laser beam quality; linear calibration

0 引言

激光的光束质量是衡量激光光束优劣的一项重要指标,也是激光应用中最为关注的一项性能指标,并且激光光束质量的测量与评价也是激光光学领域中研究的重要课题,占据着举足轻重的地位,目前国内外对此展开了深入的研究。随着对激光光束质量测量参数精度要求的不断提高,电荷耦合器件(CCD)以其功耗小、噪声低、实时性好、灵敏度高及动态范围广等诸多优点已被广泛地应用。但是在实际应用中发现,CCD对入射激光能量的光电响应特性并非满足严格的线性变化规律,而表现出一定的非线性响应特征,由于CCD的非线性响应特性,会影响对实际近场远场光斑强度分布的测量以及光束质量的测量与评价,因此研究CCD的非线性响应特性对光束质量测量的影响显得尤为重要。贺元兴,李新阳等人研究了CCD的光电响应非线性特性对激光远场焦斑的峰值斯特雷尔比、光束值以及包围能量比等评价指标的影响^[1];刘亚群,唐顺兴等人则主要研究了CCD的光电响应非线性特性对激光近场填充因子以及激光远场包围能量比的影响^[2]。近年来,激光光束质量因子(衍射极限倍数 M^2 因子)克服了常用的光束质量评价方法的局限,可同时表征激光的近场和远场特性^[3],并且能够综合描述激光束的品质,可以从本质上反映激光束的光束质量,对激光光束的评价具有十分重要的意义。

文中以光强二阶矩法定义激光束宽,选用面阵型CCD光电探测器作为测量元件,通过搭建实验平台,分析了系统中面阵探测器CCD的非线性响应特性,然后描述了CCD的光电响应非线性特性在不同

激光波长下对光束质量 M^2 因子的影响,并在此基础上,得出一种新的基于面阵型光电探测器的光电响应特性标定方法,利用CCD光电响应特性的标定结果对图像进行灰度修正,可得到较为真实可靠的激光光斑能量分布,有效地提高了激光光束质量的测量精度。

1 理论分析

激光器的空间光束参量(如光场分布、光束宽度、发散角、光束质量因子和光束稳定性等)是影响激光器应用效果的重要因素。许多领域需要精确测量激光器的束宽、远场发散角、束腰位置和 M^2 因子等参量,其中束宽的测量是基础^[4]。只有精确测得激光器的束宽,才可以得到比较准确的激光器的空间光束参量。对于束宽的测量方法主要有小孔扫描法、狭缝扫描法、刀口扫描法、可变光阑法和阵列探测法等,随着对激光光束质量测量精度要求的不断提高,在各种激光器光束参数的测量方法中,以电荷耦合器件CCD为代表的阵列探测法具有其他方法不可比拟的优势,已经成为目前激光远场光斑强度测量和光束质量诊断的主要手段。在利用CCD探测技术测量激光光斑强度分布时,考虑到实际CCD工作过程中所存在的“死区”以及非线性饱和效应等非线性光电响应特征,所以测量前,必须要对面阵型CCD探测器的光电响应特性作标定。

1.1 CCD的非线性响应特性研究

CCD是一种广泛应用的光电检测设备,它能将入射到其光敏面上的光信号转换为电荷信号,并且在一定的时序驱动下,将这些电荷信号按照像元的顺序依次输出。这样,每个像元的输出信号就代表了入射到光敏面上的光信号。在CCD的工作范围内,

它有着线性的光电响应特性,但当光照强度达到一定程度时,CCD 像元中存储的电荷就会饱和,过多的电荷就会溢出到相邻的像元和 CCD 基底中,CCD 的光电响应就不再表现为线性特性,从而影响光电测量^[5]。

利用 CCD 探测技术来表征激光束的基本特性,对于呈高斯分布的激光束,其光强在光轴附近最大,偏离光轴越远则光强越小,光强的横向分布可用下式来表示:

$$I(r)=I_0\exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \quad (1)$$

式中: I_0 表示光轴($r=0$)处的光强; w 定义为光束半径。

激光器内的振荡模式,按光场空间分布或传输特性的不同,区分不同的横模;按频谱的不同区分不同的纵模。激光的线宽和相干长度由纵模决定,而光束发散角、光斑直径和能量的横向分布则由横模决定。一般用 TEM_{mq} 来表述激光谐振腔内电磁场的情况,其中 TEM 代表横向电磁场, m, n 表示沿垂直于传播方向某特定横模的阶数, q 表述纵模的阶数。

当 $m=n=0$ 时, TEM_{00} 模的光场呈高斯分布,称为基模高斯光束。对于基模高斯光束的光斑中心最亮,向外光强逐渐减小,但无清晰地锐边,光强呈高斯型分布。基模高斯光束横截面内的光强分布可用下式来表示:

$$I(x, y, z)=\frac{c}{w(z)}e^{-\frac{r^2}{w^2(z)}}e^{-i\left[k\left(z+\frac{r^2}{2R}\right)-\arctan\frac{z}{f}\right]}$$

$$r=\sqrt{x^2+y^2}$$

$$w(z)=w_0\sqrt{1+\left(\frac{z}{f}\right)^2}$$

$$R(z)=z+\frac{f^2}{z}$$

$$f=\frac{\pi w_0^2}{\lambda}, w_0=\sqrt{\frac{\lambda f}{\pi}} \quad (2)$$

式中: $I(x, y, z)$ 表示该截面(x, y, z)处距离中心点为 r 处的光强值; $w(z)$ 为传播轴线 z 点处高斯光束的半径; $R(z)$ 为传播轴线 z 点处高斯光束等相位面曲率半径; f 称为高斯光束的共焦参数。

1.2 光束质量 M^2 因子分析

近年来,一种表征激光光束质量的 M^2 因子被国际光学界所公认,它克服了常用光束质量评价方法的局限性,并由国际标准化组织(ISO)予以推荐^[6]。 M^2

因子被称为激光光束质量因子或衍射极限因子,其定义为:

$$M^2=\frac{\text{实际光束束宽}\times\text{远场发散角}}{\text{理想高斯光束束宽}\times\text{远场发散角}}=\frac{\pi}{4\lambda}d_0\times\theta_f \quad (3)$$

式中: d_0 为激光束宽; θ_f 为远场发散角; λ 为激光波长。

由 M^2 因子定义式可知,无论采用哪种测量方法,激光光束质量的测量都可归结为激光束宽与远场发散角的测量,其理论基础是激光束的束宽和远场发散角乘积不变原理^[7]。

根据 ISO 标准,激光束宽使用光强二阶矩法来定义^[8], x 和 y 方向上的束宽分别为:

$$\begin{cases} d_x=4\times\sigma_x \\ d_y=4\times\sigma_y \end{cases} \quad (4)$$

令光束横截面上的强度分布为 $I(x, y)$, 其光强二阶矩为:

$$\begin{cases} \sigma_x^2(z)=\langle x^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\bar{x})^2 I(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dx dy} \\ \sigma_y^2(z)=\langle y^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (y-\bar{y})^2 I(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dx dy} \end{cases} \quad (5)$$

式中: (\bar{x}, \bar{y}) 为光束强度分布的一阶矩。光强二阶矩原理示意图如图 1 所示。

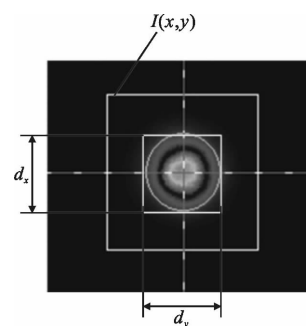


图 1 激光束的光强二阶矩原理示意图

Fig.1 Diagram of the second-moment principle of light intensity of laser beam

根据光束在近场和远场的二阶矩,光束质量因子 M^2 因子定义为:

$$M^2=\sqrt{\frac{\sigma_{z_n}^2 \cdot \sigma_z^2}{\theta_{z_n}^2 \cdot \theta_z^2}} \quad (6)$$

式中： $\sigma_{z_0}^2$ 为任意光束在束腰位置的二阶矩； σ_z^2 为任意光束在远场的二阶矩； $\theta_{z_0}^2$ 为基模高斯光束(TEM₀₀) 在束腰位置的二阶矩； θ_z^2 为基模高斯光束在远场的二阶矩。

因此，为了精确地测量激光光束质量 M^2 因子，其中激光光束束宽的测量是获得激光光束质量的关键和基础。

2 CCD 光电响应标定

CCD 的光电响应特性反映的是输入光强分布和输出灰度值之间的对应关系，由于 CCD 动态响应范围有限，CCD 的光电响应特性只在一定区间内呈现良好的线性关系，该特性直接关系到测量系统的测量精度，对其进行标定的目的就是要建立 CCD 输出灰度分布和对应的输入光强分布的对应关系，为 CCD 采集的图像变换为入射光的能量分布提供转换基准。

标定前，搭建实验平台如图 2 所示，首先利用 CCD 对激光传播路径上不同位置横截面的光束进行采样，采集不同位置的光斑图像，然后在分析软件中对这些光斑图像计算出不同位置所对应的光斑大小 d_x 和 d_y ；在每一位置处，适当调节衰减，使光斑图像处于不同光强下，统计并记录此时所对应的光斑大小；当统计完所有位置处对应的不同光强下的光斑大小 d_x 和 d_y ，分别找出并记录同一位置处 d_x 和 d_y 的差值，保证差值在一个像元尺寸内；最后找出所有位置处的所对应的光强最大值和光强最小值，此时的光强范围即为相机所标定的光强线性区间。

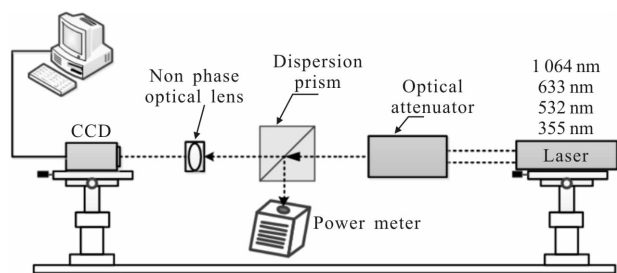


图 2 CCD 相机的光电响应特性测量装置示意图

Fig.2 Schematic of measuring equipment of the optoelectronic characteristics of the CCD camera

在光束质量测量的过程中，为了保证测量结果

的准确性，必须要对面阵 CCD 的光电响应线性区间进行标定，通过标定好的线性范围来限定灰度峰值范围达到减小 CCD 的光电响应非线性特性的影响，但是这种方法不能充分利用 CCD 的灰度范围，具有一定的局限性，为此，文中提出了一种新型的基于面阵型 CCD 的光电响应非线性灰度修正算法，该算法实现步骤如下：

首先对 CCD 相机的光强灰度值 i 在 $[0, 4095]$ 范围内进行归一化处理，即

$$V = \frac{i}{4095} \quad (7)$$

其次，通过记录图像所有灰度值 i 所对应的实际激光功率值 P ，建立灰度值和激光功率值之间的映射关系表。

然后，通过如图 3 所叙述的 $P-R$ 映射关系，利用牛顿迭代法计算此时光强灰度值 V 所对应的 R 值。

最后，利用得到的 R 值对 CCD 的光强灰度值 I 进行重新定义：

$$I = R \times 4095 \quad (8)$$

通过对图像中的光强灰度值建立这种映射关系，就可以对图像中的所有灰度值进行非线性灰度修正，从而可以容易地对 CCD 的光电响应非线性特性进行校正。

3 实验与数据分析

在以面阵型 CCD 光电探测器的测量系统中，光电探测器 CCD 的性能对测量结果具有重要影响。在进行激光光束质量测量时必须使用高信噪比、高分辨率、空间响应均匀、线性的光电探测器，以及无相差的光束变换系统和无畸变光学衰减系统，同时必须基于光强二阶矩算法^[9]。该测量系统主要由激光器、衰减片组、无像差透镜、分光棱镜、功率计、CCD 相机、计算机和精密机械工作台等组成。在本测量系统中，文中选用德国 Basler 公司的 ACA1600-20gm 高分辨率相机，分辨率 1628×1236 ，位深度为 12 位，其噪声小，光谱响应范围广，可适应可见光波段和红外波段激光器的光束质量测量；美国 Thorlabs 公司的 N-BK7 系列无像差透镜，其焦距为 300 mm，美国 Thorlabs 公司的无畸变光学衰减器，选用波长分别为 355、532、633、1064 nm 的模 He-Ne 激光器；选用以色列 OPHIR 激光功率计。

CCD 相机的光电响应特性测量装置示意图如

图 2 所示。

系统的总体构成是由四种不同波长的激光器产生激光,考虑该系统中激光光束的能量可能远超过 CCD 探测器的饱和能量值,甚至超过 CCD 像元的损伤阈值可能损坏 CCD 器件^[10],因此,必须对入射到 CCD 相机光敏面上的激光光束能量进行衰减,使 CCD 接收能量不至于过饱和,以保护 CCD 相机,经过衰减后的激光光束进入到分光棱镜,分光棱镜将光束分为两束,其中一束直接到达功率计,可探测激光的功率,另一束直接传入到无像差透镜中,无像差透镜用于保证激光的束腰处于可测量的范围内^[11],最后光束传入到 CCD 相机中,由相机完成激光光斑图像的采集。计算机获得图像数据后,由分析软件进行分析,最终得到光斑大小和光束质量 M^2 因子。

CCD 相机的光电响应特性测量装置实验图如图 3 所示。

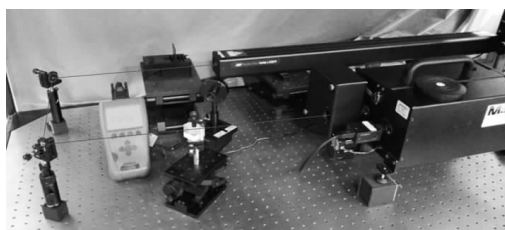


图 3 CCD 相机的光电响应特性测量装置实验图

Fig.3 Diagram of experiment on photoelectric response characteristic device of the CCD camera

测量过程中,保证其他外部条件不变,分别换用不同波长的激光器进行测量,同时采用不同 OD 值的衰减片组合,记录在不同激光功率大小情况下功率计所探测到的激光功率,然后在分析软件中获得所对应每幅图像的峰值光强值,由于面阵 CCD 相机的位深度为 12 位,所以灰度值的范围在 0~4 095。对得到的每组功率值和光强值进行归一化处理,使用仿真软件,对得到的数据进行处理,得到如图 4 所示的 CCD 相机的光电响应特性曲线图。

从图 4 可以得出,对于理想的 CCD 相机,其光电响应特性呈良好的线性变化规律,而在实际情况下,对于在不同激光波长下 CCD 相机的光电响应特性不再满足严格的线性变化规律,而表现出一定的非线性规律,并且随着功率的增加,对于四种不同激光波长使用同一 CCD 相机所探测到的光强比理想

的 CCD 相机要高。根据所记录的实验数据,采用最小二乘拟合得到四种激光波长条件下的拟合结果如下:

在 1 064 nm 波长条件下:

$$R = -0.4973P^4 + 1.5242P^3 - 2.0485P^2 + 2.0221P$$

在 633 nm 波长条件下:

$$R = -0.3504P^4 + 1.1767P^3 - 1.67P^2 + 1.8441P$$

在 532 nm 波长条件下:

$$R = -1.773P^4 + 4.14P^3 - 3.7222P^2 + 2.3545P$$

在 355 nm 波长条件下:

$$R = -56.927P^6 + 180.6P^5 - 219.8P^4 + 128.18P^3 - 36.214P^2 + 5.1455P$$

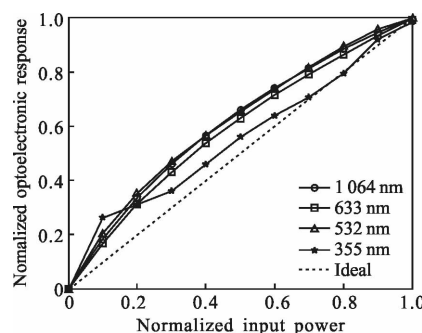


图 4 四种不同波长 CCD 相机的光电响应特性曲线图

Fig.4 Curves graph of optoelectronic response characteristics of the CCD camera at four different wavelengths

由于测量误差的客观存在,真值或约定真值具有不可知性,使得测量结果具有一定的不确定性。对样本观测值用统计分析的方法进行不确定度评价,对于正确评价测量结果与误差分析十分必要。

一般地,笔者用 n 次测量的算术平均值 \bar{L} 来代表被测量的估计值(即真值),用测量值 l_i 与算术平均值 \bar{L} 之差(残差)来表示不确定度 σ ,则不确定度为 n 次测量的算术平均值的标准差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_i - \bar{L})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_i - \bar{L})^2} \quad (9)$$

而随机误差常用表征其取值分散程度的标准差来评定,对于拟合多项式函数的随机误差可用下式来表示:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{xn}^2} \quad (10)$$

通过对上述每组的十个样本值进行统计计算与分析,根据公式(9)得出最小二乘线性拟合的不确定度都小于 0.001 25,由公式(10)得到最小二乘拟合的

随机误差估计值大约为 0.001 875。通过对每组实验中的样本数据进行多次统计测量,拟合所带来的误差可忽略不计,保证数据记录过程中的准确性。

通过多次实验,根据所得到的曲线拟合结果,可以总结出,使用未标定的面阵 CCD 相机对入射激光能量的光电响应特性表现出一定的非线性响应特征,在激光光束质量的测量过程中,会对光束质量的测量造成一定的影响,为此,可以推断 CCD 的非线性响应特性对光束束宽具有一定的影响。

而光束质量测量是要获得在与激光传播方向垂直的光束横截面上光场分布状态及变化情况。为此,利用 CCD 相机对激光传播路径上不同位置横截面的光束进行采样,采集不同位置的光斑图像,使用光束参数测量软件对所记录的数据进行分析整合,利用上述标定方法所测得的 CCD 的线性区间为 [1 605, 3 245],得到不同激光波长下所对应的光束束宽仿真结果图,如图 5 所示。

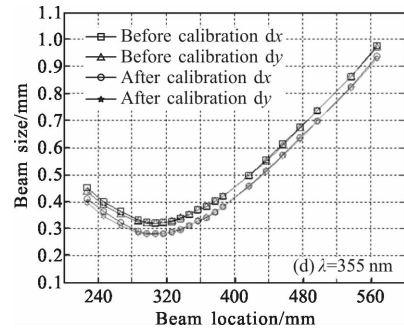


图 5 四种不同激光波长下光束束宽仿真结果图

Fig.5 Simulation diagram of the beam size at four different wavelengths

从图 5 中可以看出,对比相同实验条件下使用国际标准的激光光束质量测量仪所测得的激光束宽,在不同激光波长下使用未标定的面阵探测器 CCD 测得的激光光斑束宽比标定后测得的束宽大,因此,CCD 的非线性响应特性对激光光束的束宽具有一定的影响,为了更好地减少 CCD 的光电响应非线性特性对激光束宽的影响,对 CCD 的光电响应非线性特性标定是提高激光束宽测量精度的重要途径。

最后,通过对比使用国际标准激光光束质量分析仪测得的 M^2 因子值,使用未标定和标定后的 CCD 分别对四种不同激光波长的激光器的光束质量 M^2 因子值进行多次测量,测量实验结果对比如表 1 所示。

表 1 校正前和校正后光束质量因子结果对比

Tab.1 Comparison of the beam propagation factor results before and after calibration

Wave-length /nm	International laser beam profilers		Before calibration		After calibration	
	M_x^2	M_y^2	M_x^2	M_y^2	M_x^2	M_y^2
1 064	1.123 72	1.132 74	1.180 42	1.190 25	1.156 53	1.159 51
633	1.019 33	1.007 98	1.063 17	1.061 43	1.043 27	1.041 21
532	1.235 38	1.254 32	1.289 38	1.312 36	1.258 84	1.280 21
355	1.285 32	1.293 52	1.337 22	1.346 24	1.303 24	1.316 22

由表 1 可以看出,与使用国际标准激光光束质量分析仪测得的光束质量因子相比,CCD 未标定前,所测得的光束质量 M^2 因子值普遍比使用国际标准仪器测得的值要大,而对 CCD 相机进行光电响应非线性修正后,所测得的光束质量 M^2 因子与国际标准仪器接近。

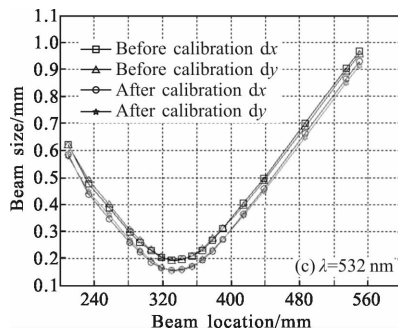
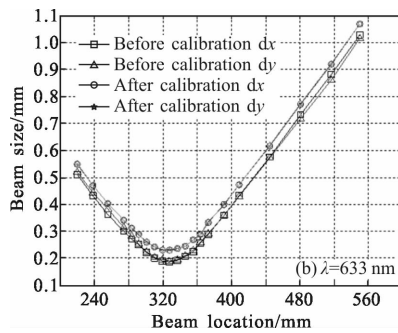
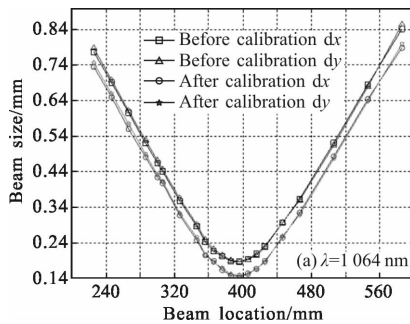


表 1 中, 分别对校正前后的光束质量因子结果进行对比, 得到不同激光波长下光束质量因子误差曲线图, 如图 6 所示。

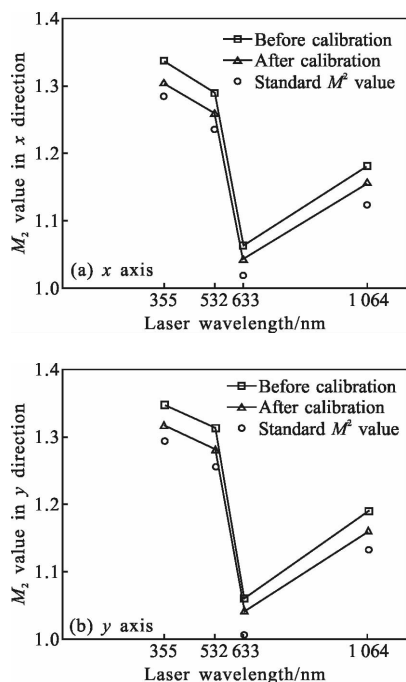


图 6 四种不同波长下光束质量因子误差曲线

Fig.6 Error curves of the beam propagation factor results at four different wavelengths

和标定前相比, 进行线性标定后测得的光束质量 M^2 因子相对误差降低了 2.36%。由此可见, 标定后的光束质量因子更接近于标准值, 并且测得的光束质量因子比标定前更加准确。说明该标定方法可以在一定程度上减少了 CCD 相机的非线性特性对激光光束质量的影响, 进一步提高了激光光束质量的测量精度。

4 结 论

文中研究了在四种特定激光波长下 CCD 相机的非线性响应特性对激光光束质量 M^2 因子的影响, 通过实验平台的搭建, 证明了系统中面阵探测器 CCD 的光电响应非线性响应特性, 然后描述了 CCD 的光电响应非线性特性在不同激光波长下对光束束宽测量的影响, 并在此基础上, 提出了一种新的面阵探测器 CCD 光电响应非线性标定算法, 通过实验结果对比, 利用 CCD 光电响应特性的标定结果对图像进行灰度修正, 对比国际标准激光光束质量分析仪,

所测得的光束质量因子更准确, 根据实验结果可得如下结论:

(1) 对于未标定的 CCD 而言, 由于 CCD 本身的非线性响应特性的存在, 在进行对激光光束质量的测量过程中, 会影响所测得的激光光斑束宽的大小, 从而会影响最终的激光光束质量因子的准确度和精度。因此, 为了更准确地评价激光的光束质量, 在对激光光束参数进行测量前, 必须要对 CCD 进行光电响应进行线性标定。

(2) 通过上述标定算法可以有效地对 CCD 相机的非线性灰度进行灰度修正, 解决了 CCD 灰度范围区间窄的问题, 可以消除 CCD 的非线性响应特性对光束质量测量所引入的测量误差, 提高了 CCD 的灰度利用率, 从而得到更准确而又更精细的激光能量分布, 对于正确评价激光光束质量具有十分重要的意义。

参 考 文 献:

[1] He Yuanxing, Li Xinyang. Analysis of influence of CCD's nonlinear response characterization on measurement results of focal spot and beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0408001. (in Chinese)
 贺元兴, 李新阳. CCD 光电响应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量计算的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0408001.

[2] Liu Yaqun, Tang Shunxing, Guo Yajing, et al. Analysis of influence of CCD's nonlinear photoelectric characterization on evaluation the high power laser beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0402001. (in Chinese)
 刘亚群, 唐顺兴, 郭亚晶, 等. CCD 光电响应非线性特性对高功率激光光束质量评价的影响 [J]. 中国激光, 2015, 42(4):0402001.

[3] Lv Baida, Ji Xiaoling, Luo Shirong, et al. Parametric characterization of laser beams and beam quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 15-17. (in Chinese)
 吕百达, 季小玲, 罗时荣, 等. 激光的参数描述和光束质量 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1):15-17.

[4] Wang Yanping, Wang Qianqian, Ma Chong. Factors affecting the accurate measurement of laser beam width with CCD camera[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0208002.
 王艳萍, 王茜茜, 马冲. 影响基于 CCD 相机激光光束宽度精确测量的因素[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0208002.

- [5] Liu Zexun, Quan Xianrong, Ren Jianwei, et al. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2212–2215. (in Chinese)
刘则询, 全先荣, 任建伟, 等. CCD 相机输出非均匀性线性校正系数的定标 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2212–2215.
- [6] Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1643–1653. (in Chinese)
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643–1653.
- [7] Huang Linhao, Liao Xuebing, Zhao Haiyan, et al. Utilizing laser beam analyzer to measure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2197–2200. (in Chinese)
黄林昊, 廖学兵, 赵海燕, 等. 利用光束质量分析仪测量因子[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2197–2200.
- [8] Lv Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 47–51. (in Chinese)
吕百达, 康小平. 对激光光束质量一些问题的认识 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 47–51.
- [9] Liu Minshi, Wang Xiaoman, Jing Wenbo. Influence of double door adaptive threshold value on measurement precision of beam quality factor [J]. *Journal of Jilin University*, 2012, 42(4): 1066–1070. (in Chinese)
刘敏时, 王晓曼, 景文博. 双波门自适应阈值法对光束质量因子测量精度的影响 [J]. 吉林大学学报, 2012, 42(4): 1066–1070.
- [10] Zhang Haizhuang, Meng Zhiyong, Ding Shuai, et al. Laser spot image acquisition method by using CCD camera method[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2013, 11(5): 33–35. (in Chinese)
张海庄, 孟智勇, 丁帅, 等. CCD 摄像法采集激光光斑图像方法研究[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(5):33–35.
- [11] Zhang Haizhuang, Yao Mei, Lei Ping, et al. Research of image processing method of far-field laser spots [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 460–463. (in Chinese)
张海庄, 姚梅, 雷萍, 等. 远场激光光斑图像处理方法研究 [J]. 激光技术, 2013, 37(4): 460–463.