

文章编号: 1001-3806(2015)06-0845-05

## 双狭缝扫描法测量激光光束质量

李蕾, 臧景峰\*

(长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 现有激光光束质量的测量方法无法同时兼顾测量速度与测量精度。为了达到兼顾速度与精度的目的,提出了双狭缝扫描法。此方法不需要在光路中使用衰减器,从而降低了数据分析复杂度。选用嵌入式技术完成对整个系统的控制与数据处理,便于携带,可实现对数据的实时处理;同时进行了理论分析和实验验证。结果表明,该方法可实现快速同步测量两轴的功率分布,动态范围可达到70dB,扫描频率为2Hz~18Hz,可用于分析连续或脉冲激光光束。该方法对兼顾测量速度与精度是有帮助的。

**关键词:** 激光光学;双狭缝扫描法;激光光束质量;功率分布;实时处理

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.024

### Measurement of laser beam quality by means of double-slit scanning method

LI Lei, ZANG Jingfeng

(School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Available measurement methods of laser beam quality can't reach the demands of speed and accuracy simultaneously. In order to take speed and precision into account, a double-slit scanning method was proposed. The complexity of data analysis reduced because attenuator was not used in the optical path. Embedded technology was selected to control and process the data, and real time data processing can be realized while the whole system was easy to carry. After theoretical analysis and experimental verification, the results show that this method can get fast synchronous measurement of dual axis shaft power distribution. Dynamic range can reach 70dB and scan rate is from 2Hz to 18Hz. This method can be used for the analysis of continuous or pulsed laser beam and is helpful for reaching the demands of both measurement speed and accuracy.

**Key words:** laser optics; double-slit scanning method; laser beam quality; power distribution; real-time processing

### 引言

激光广泛应用于科研、工业等领域,选用的激光的光束光强分布大多为近似高斯分布,所以对近似高斯分布的激光光束的质量分析至关重要。激光光束质量检测的主要方法有电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)法、刀口法、小孔法、狭缝法等<sup>[1-4]</sup>。

CCD法可以测量光强分布较复杂的激光光束<sup>[5]</sup>,但是其光束强度横向分布常存在饱和失真问题,需加衰减片,易引起其图像的边缘失真,这样就增加了数据分析的复杂度,降低了数据处理速度<sup>[6-8]</sup>。刀口法与小孔法一样,在刀口或小孔尺寸一定的情况下,无法测量尺寸小于或与之处于同一量级的光斑。且小孔法测量时间长,无法直接获得光斑能量边缘分布。由于实际需要,因此对狭缝法进行了改进提出了双狭缝扫描法。

作者简介:李蕾(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为信号检测、信号处理理论与技术。

\* 通讯联系人。E-mail: lileihoney521@126.com

收稿日期:2014-12-03;收到修改稿日期:2015-02-13

传统狭缝法虽然可以直接得到激光光斑的能量边缘分布,但是不能直接测得激光光斑光强的面分布,无法正确还原一些复杂的光斑能量分布<sup>[1-3]</sup>。

作者对传统狭缝法进行了一些改进,采用双狭缝扫描法,克服了这些缺点。双狭缝扫描法是动态扫描的方式,只要扫描速度达到一定的频率,传感器的分辨率足够高,机械移动步距范围足够大,就可以还原复杂的近高斯激光光强分布,测量速度快、测量精度高。

### 1 测量原理

作者提出了一种基于狭缝法测量原理<sup>[2-4]</sup>的双狭缝扫描法。狭缝扫描仪结构原理图如图1所示。狭缝扫描仪包含有一个转动轮,转动轮上有两对不同宽度(5 $\mu\text{m}$ 与25 $\mu\text{m}$ )的互相垂直的狭缝。转动轮里安装有一个无刷旋转电机,可控制转动轮转动,改变转动速率,扫描频率可实现2Hz~18Hz。激光从狭缝扫描仪入射口射入,转动轮转动的同时,垂直狭缝实现对激光的扫描。扫描的同时,转动轮里面的光电探测器记录功率大小与位置信息,即可得到不同时刻 $x$ 轴与 $y$ 轴

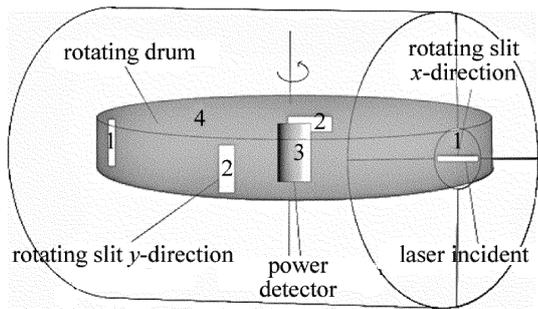


Fig. 1 Structure diagram

不同位置不同时刻的功率大小。对数据进行处理,可得到  $x$  轴与  $y$  轴的功率分布曲线,通过分析可得出总功率分布。由  $x$  轴和  $y$  轴上的功率分布曲线可以对光束特性进行分析,得出光束直径、椭圆率、中心位置等一些描述光束质量的参量<sup>[4-5]</sup>。

连续激光的光波是连续射出的,无论扫描频率设为多少,每次扫描都可以得到切面上完整的功率分布,故测量精度与狭缝扫描频率的关系较为简单。双狭缝扫描法也可以测量脉冲激光功率分布,但是由于脉冲激光的光波并不是连续射出,如果频率设置不合理,就无法保证每一次都能得到切面完整的功率分布,故狭缝扫描频率的改变对脉冲激光的功率测量精度影响较大。

如果脉冲激光具有高频率短脉冲的特点,测量方式就与连续激光一样。例如典型的飞秒激光器,拥有超过 100MHz 以上的频率,脉冲持续时间低于 100fs。这种情况下,光敏二极管的电流放大器由于它的有限的带宽,它测到的不是一个脉冲信号,而是一个连续信号,故可按照连续激光的方式进行数据处理。如果脉冲激光的频率在 18Hz 以内,则可以手动调节狭缝扫描频率接近激光中心频率进行测量。如果脉冲激光的频率以 kHz 为单位,扫描频率只能达到 2Hz ~ 18Hz,实现不了狭缝扫描频率与激光中心频率接近,此时需设置扫描频率能整除激光频率。比如,激光频率为 100Hz,设置扫描频率为 10Hz,那每一个 10 的整数倍的脉冲将会被完整扫描到。随着扫描次数的累积,得到的数据叠加平均过程如图 2a ~ 图 2c 所示,最后处理得到  $x$  轴与  $y$  轴的功率轮廓分布(见图 2d)。

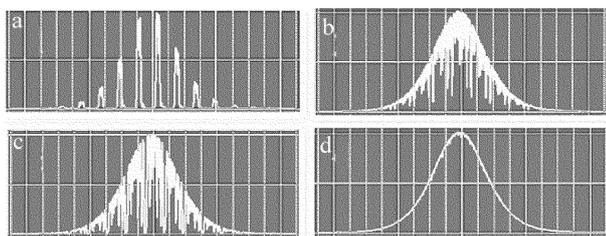


Fig. 2 Change process of pulse laser scanning

## 2 控制系统设计

嵌入式系统有着低功耗、低成本、高可靠性、对数据可实时处理<sup>[9-11]</sup>的优点,所以采用嵌入式技术完成对整个系统的控制。控制电机转动可带动转动轮转动从而实现狭缝转动,对激光光束进行扫描。扫描后得到的  $x$  轴与  $y$  轴功率值传递给嵌入式系统,经过嵌入式系统的处理计算,最后将分析的结果在显示屏上显示。系统方案如图 3 所示。

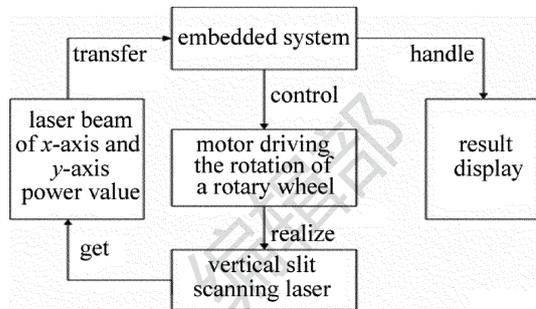


Fig. 3 Scheme of system structure

为了实现对数据的精准快速处理,系统选用了 Cortex-A9 处理器,在 Cortex-A9 处理器上运行嵌入式 Linux 系统,从而实现了系统的小型化,方便携带,可实现随时随地测量激光光束质量<sup>[12]</sup>。

## 3 扩展系统

如还需对光束质量因子  $M^2$  进行测量,可以加扩展系统。光束质量因子测量装置模拟图如图 4 所示,激光从扩展系统入射后(入射口安装有抗反射涂层的透镜),打向反射镜,经过反射镜反射后进入双狭缝扫描仪,继续上述介绍的狭缝测量过程。反射镜安装在拖动台上,伺服电机控制拖动台移动,从而控制激光从入射口到狭缝扫描仪的行程长度。测量方法与传统的  $M^2$  测量方法一致,调整反射镜的位置,使得光束束腰接近行程的中间位置。拖动台沿着光束传播方向移动,在不同的位置测量激光束宽,用双曲线拟合确定光束束腰的位置和大小,实验数据采用三点法进行处理,进行二项式拟合,即可得到光束质量因子的大小<sup>[13-14]</sup>。

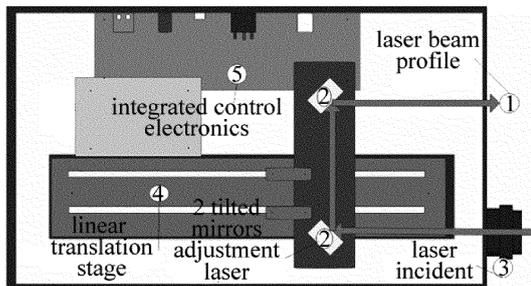


Fig. 4 Simulation diagram of expansion platform

并且移动反射镜改变光路行程的同时,狭缝扫描仪也记录下激光的功率大小。

#### 4 测量数据

为了与传统狭缝扫描法进行对比分析,对同一激光器发出的高斯激光分别使用了传统狭缝法与双狭缝扫描法进行测量。

使用双狭缝扫描法测量时,功率探测器测量得到的  $x$  轴与  $y$  轴功率分布曲线如图 5 与图 6 所示。知道了  $x$  轴与  $y$  轴的功率分布,可通过功率通量法<sup>[15-16]</sup> 计算得出光束直径、椭圆率,分析中心位置,并且可以通过中心位置的位置漂移,分析激光光束的好坏。通过  $x$  轴与  $y$  轴的功率分布,可以得到激光的 2-D 功率分布图像,也可以模拟出 3-D 功率图像。

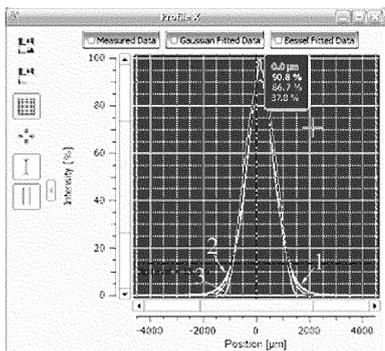


Fig. 5  $x$  axial power distribution with double slit scanning method

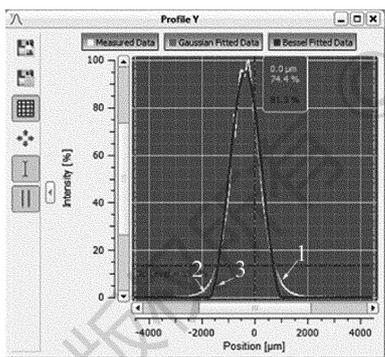


Fig. 6  $y$  axial power distribution with double slit scanning method

图 5 与图 6 中曲线 1 是实际测得的激光功率曲线,曲线 2 是近似高斯适应函数,曲线 3 为近似贝塞尔

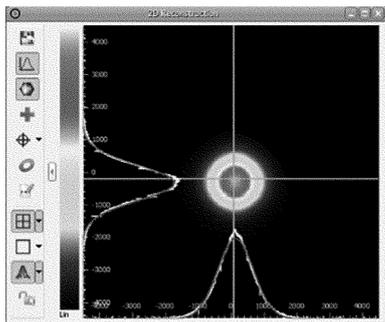


Fig. 7 2-D image with double slit scanning method

曲线。如果对能量峰值进行自动定量,测量曲线显示相对强度百分比从 0% 到 100%,100% 表示  $x$  轴与  $y$  轴强度的最大值。

经过计算处理后得到的 2-D 图像如图 7 所示,3-D 图像如图 8 所示。

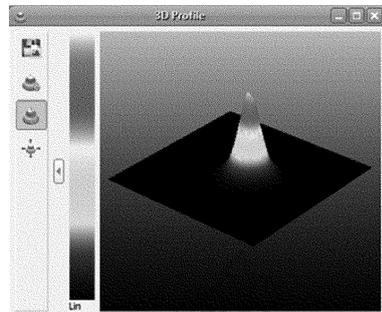


Fig. 8 3-D image with double slit scanning method

使用传统狭缝扫描法测量时,功率探测器测量得到的  $x$  轴与  $y$  轴功率分布曲线如图 9、图 10 所示,3-D 图像如图 11 所示。

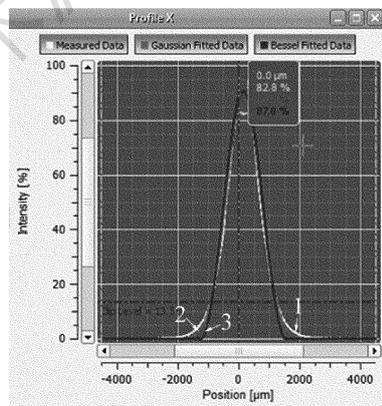


Fig. 9  $x$  axial power distribution with traditional slit scanning method

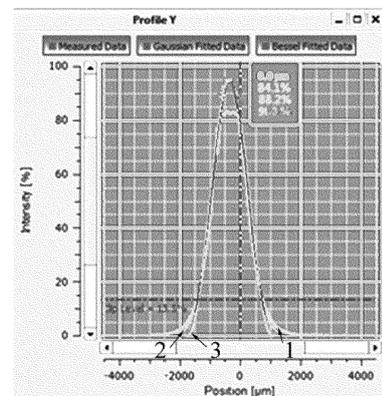


Fig. 10  $y$  axial power distribution with traditional slit scanning method

可以明显看到,使用传统狭缝法测量得到的 3-D 图像有失真,这是由于使用传统狭缝法测量,狭缝可测量的位置与数据都有限,虽然可以很方便地得到激光光斑的能量边缘分布,但是无法直接得到面分布,还原出的 3-D 图像也出现了严重失真。

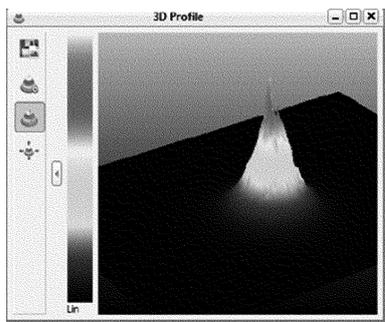


Fig. 11 3-D image with traditional slit scanning method

## 5 测量精度

测量精度受数模(analog/digital, A/D)转换器采样率的限制, A/D 转换器采样率越高, 测得的数据精度越高。系统选用 16 位的 A/D 转换器。测量连续激光时, 当狭缝宽度为  $25\mu\text{m}$  时, 数据精度只在扫描频率大于 15Hz 时才有变化。当狭缝宽度为  $5\mu\text{m}$  时, 测得的数据精度很大程度上受扫描频率的影响, 经过多次试验测得扫描频率与功率数据精度关系如图 12 所示。可以看出, 在狭缝宽度与 A/D 转换器采样率不变的同时, 随着扫描频率的增加, 精度越高, 但扫描频率达到 12Hz 以上时, 精度几乎不再变化。

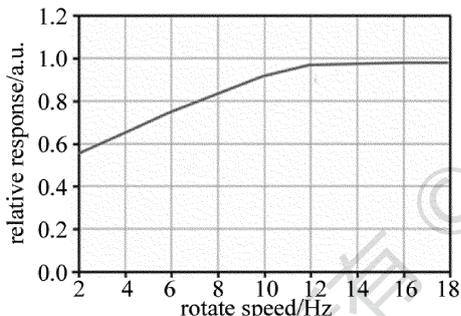


Fig. 12 Measurement precision of continuous wave laser

经过多次测量实验, 验证了狭缝扫描频率与激光中心频率存在整数倍关系时, 测得的数据精度较高。当两者存在整数倍关系时, 每一次扫描都能得到切面完整的功率分布。如果两者不存在整数倍关系, 不能保证每一次扫描得到的数据都是完整的, 数据不完整的需要舍去。在使用相同的时间前提下, 两者不存在整数倍关系时得到的数据量更小, 会影响最后的测量精度。如果在两者不存在整数倍关系时还想得到更高的处理精度, 就需要延长扫描时间, 这样就增加了扫描的次数, 需要更长的时间。但是如果仪器运行时间过长, 产生的一些热量会对电路有一定的影响, 难免会产生一些噪声产生误差。所以为了保证测得的数据精度, 设置狭缝扫描频率与激光中心频率为整数倍关系。

选用精准的脉冲频率为 6Hz 的激光进行测量, 在使用相同时间的前提下, 改变狭缝扫描频率, 通过多次

试验得到的扫描频率与功率数据精度关系如图 13a 所示。当扫描频率为 6Hz, 12Hz, 18Hz 时, 测量精度很高, 但当扫描频率为其它不是激光中心频率整数倍的情况时, 测量精度并不高。选用精准的脉冲频率为 8Hz 的激光进行测量, 在使用相同时间的前提下, 改变狭缝扫描频率, 通过多次试验得到的扫描频率与功率数据精度关系如图 13b 所示。当扫描频率为 8Hz 和 16Hz 时, 测量精度很高, 但当扫描频率为其它不是激光中心频率整数倍的情况时, 测量精度同样也不高。

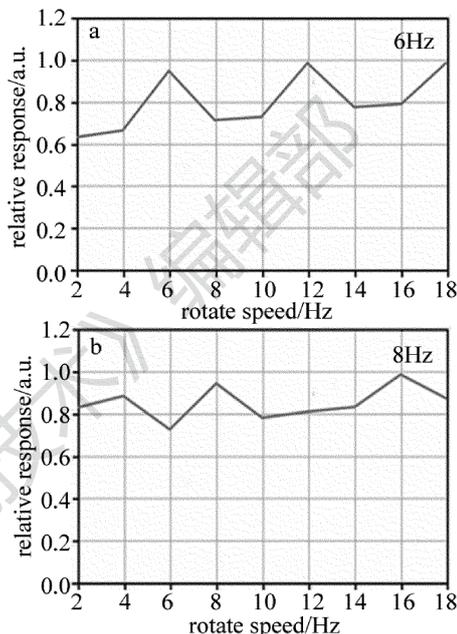


Fig. 13 Measurement precision of pulse laser

## 6 结 论

在传统的单狭缝扫描法的基础上, 提出了可以快速精准测量近高斯激光束质量的双狭缝扫描法, 并用该测量系统对高斯激光进行了测量实验。理论分析与结果表明, 双狭缝扫描测量激光能量分布的方法可以准确快速地测量近高斯激光的能量分布, 并且可以加扩展系统完成光束质量因子  $M^2$  的测量, 对光束质量有一个完整的系统分析。

### 参 考 文 献

- [1] GAO Y, FAN Z W, YU J, *et al.* New algorithm for measuring flat spot and Gaussian radius knife edge method[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 261-264 (in Chinese).
- [2] HUANG D, QIU F S. Study on characteristics of spot radius and curvature radius of generalized Gaussian beam[J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 256-260 (in Chinese).
- [3] SOO C. Quality factors of a slightly inclined Gaussian beam passing through a zone plate: effect of stop shifts[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(17): 2771-2776.
- [4] HE Y X, MU B L, LI J, *et al.* Relationship between Gaussian beam quality and wavefront aberration [J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 747-752 (in Chinese).

- [5] HE Y X, LI X Y. CCD photoelectric effect of nonlinear characteristics of far field laser focal spot beam quality measurement and calculation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0408001 (in Chinese).
- [6] SU P, NIU Y X, LI D Q, *et al.* Image acquisition and processing of a laser warning system based on planar array CCD[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 394-399 (in Chinese).
- [7] ZHANG Ch, WANG B, LIAO Zh Y, *et al.* Experimental study on disturbing effect of pulsed laser against array CCD imaging systems [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 619-622 (in Chinese).
- [8] WANG Y P, WANG Q Q, MA C. The influence factors of accurate measurement of CCD camera based on the width of the laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0208002 (in Chinese).
- [9] DONG F L, ZHAO F Z, GE Y W, *et al.* The optimization of laser beam quality of full optical fiber[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 844-849 (in Chinese).
- [10] ZHANG H Zh, YAO M, LEI P, *et al.* Research of image processing method of far-field laser spots[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 460-463 (in Chinese).
- [11] QIU K, FAN Z W, XIONG X T. Technology research of super Gauss flattened distribution spatial beam shaping[J]. Journal of Optoelectronics Lasers, 2014, 25(2): 233-238 (in Chinese).
- [12] KANOLD P O, LSRAEL N, POLLEY D B, *et al.* Local versus global scales of organization in auditory cortex[J]. Review Article Trends in Neurosciences, 2014, 37(9): 502-510.
- [13] HUANG L H, LIAO X B, ZHAO H Y, *et al.* The use of beam quality analyzer to measure  $M^2$  factor[J]. Infrared and Laser Engineering. 2012, 41(8): 2197-2120 (in Chinese).
- [14] JIN A J, HOU J, JIANG Z F. Using the evaluation of supercontinuum  $M^2$  supercontinuum source beam quality factor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0502006 (in Chinese).
- [15] LIU F H, JI Y F, WANG F. Development of laser beam quality measurement system[J]. Application of Modern Physics, 2014, 5(3): 182-186 (in Chinese).
- [16] MA Z W, WEI T, FENG G Y. Theoretical analysis of the beam quality of two-side-pumped symmetrically transverse flow liquid lasers[J]. Laser Technology, 2011, 35(4): 543-546 (in Chinese).