

基于三光斑的激光束离焦量实时检测方法

王禹苏, 郭建增*, 任晓明, 刘现魁, 赵海涛, 牛志峰, 王振华

(中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027)

摘要: 为了提高强激光系统中输出光束的光束质量, 提出了一种利用三光斑来探测离焦的方法, 该方法能够在探测器上横向探测光束轴向上三处位置的光斑尺寸, 通过三光斑间的尺寸关系可计算出光束的离焦量, 进而根据离焦量进行闭环校正。实验中通过调节整形系统对光束的离焦量进行离焦补偿, 使得光束离焦量从 (4.9 ± 0.2) mm 校正至 (0.3 ± 0.1) mm。实验结果表明, 该方法结构简单, 能够测量各种因素引起的强激光的发散会聚度, 给出了离焦补偿的可靠判据, 为解决强激光热效应造成的光束发散提供了一种新方法。

关键词: 三光斑; 高能激光; 离焦检测; 闭环校正

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0805001

Real-time detection method of laser beam defocusing amount based on three spot sizes

Wang Yusu, Guo Jianzeng*, Ren Xiaoming, Liu Xiankui, Zhao Haitao, Niu Zhifeng, Wang Zhenhua

(The 718th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Handan 056027, China)

Abstract: In order to improve the beam quality of output beam in high power laser system, a method to detect defocus by using three spot sizes was presented, the spot sizes at three positions in the axial direction of the beam on the CCD detector was detected using the method, the defocusing amount of the beam can be calculated by the size relationship among the spots, and then closed-loop correction was performed according to the defocusing amount. In the experiment, the defocusing amount of the beam was compensated by adjusting the shaping system, so that the defocusing amount of the beam was corrected from (4.9 ± 0.2) mm to (0.3 ± 0.1) mm. The experimental results show that the method is simple in structure, and can measure strong laser convergence and divergence caused by various factors. The study provides reliable criteria for defocusing compensation, and a method to solve the problem of beam divergence caused by strong laser thermal effect.

Key words: three spot sizes; high energy laser; defocus detection; closed-loop correction

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-04-21

基金项目: 国家高技术发展计划(51326010201)

作者简介: 王禹苏(1991-), 女, 硕士生, 主要从事化学激光器方面的研究。Email: wangyusu0926@163.com

通讯作者: 郭建增(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光光学技术方面的研究。Email: Guojianzeng718@126.com

0 引言

随着激光技术的不断发展,激光应用在光通信、工业制造、医疗及军事领域的扩大和深入,激光参数的计量需求在原有的激光功率、激光能量、激光波长基础上,扩展至用于表述激光光束质量的空域参数^[1-9]。引起光束质量下降的原因不仅有大气湍流、光学零件表面面形误差,同时还存在温度和应力变形等^[10]。在强激光系统中,低阶像差占总像差的主要成分,其中低阶像差中主要以离焦、像散为主。因此只要定量检测到离焦、像散并将其校正,则可大大提高光束质量。

目前常用的检测方法有基于哈特曼传感器的像差探测、曲率传感器和光栅剪切干涉传感器等^[11-12]。哈特曼传感器于 1900 年由哈特曼首次提出,它的像差探测系统探测像差精确,可将像差按 zernike 多项式进行分解,清晰地定量辨别各种像差,同时也存在体积大、调试复杂等缺点。曲率传感器于 1987 年由 F. Roddier 提出,它通过测量离焦面上的光强分布求得波前的曲率和相位分布,这种方法节省了计算时间,加快了反馈速度,但其缺点是对光能的利用效率低^[13]。光栅剪切干涉传感器最早由 V. Ronchi 于 1964 提出,利用光栅衍射效应产生的波前横向剪切干涉来测量波前相位信息,但其光能利用率低,结构繁琐^[14]。

文中提出的基于三光斑进行离焦探测的方法结构简单,虽无法精确探测像差的种类,但是可有效地从宏观上探测到光束总的发散会聚度,并依据此发散会聚度进行闭环校正,达到提升光束质量的目的。

1 理论模型

以离焦像差为主,高阶像差很小的基模高斯光束作为光束模型如图 1 所示,沿 z 轴方向传播的基模

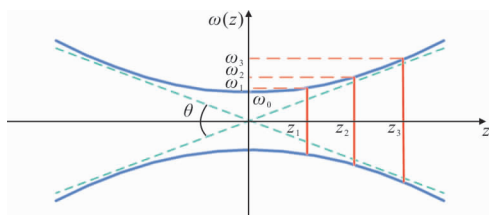


图 1 基模高斯光束

Fig.1 Fundamental mode Gaussian beam

高斯光束的场,均可表示为如下一般形式^[15]:

$$\psi_{00}(x, y, z) = \frac{c}{\omega(z)} e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}} e^{-i\left[k\left(z + \frac{r^2}{2R}\right) - \arctan \frac{z}{f}\right]} \quad (1)$$

式中: c 为常数因子; λ 为激光束波长; $r^2 = x^2 + y^2$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; f 为高斯光束的共焦参数; ω_0 为基模高斯光束的腰斑半径; $R(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径; $w(z)$ 为与传播轴线相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径:

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

平行光经透镜聚焦后,在焦点处变换为具有高斯特性的光束,光束发散角为 θ ,束腰为 ω_0 ,利用多光斑成像系统,获得焦点附近 z 方向等距离 d 的三个光斑,坐标分别为 z_1, z_2, z_3 ,束腰半径分别为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$;其中第二个光斑位于第一和第三个光斑中间,且 z_1, z_2, z_3 间的距离根据多光斑成像系统固定,不随入射光束的发散或会聚而改变。由此可知:

$$z_1 + d = z_2, z_2 + d = z_3 \quad (3)$$

令

$$u_1 = \omega_2^2 - \omega_1^2 = \frac{\omega_0^2}{f^2} (z_2^2 - z_1^2) = \frac{\lambda}{\pi f} d(z_1 + z_2) = \frac{\lambda}{\pi f} d(2z_2 - d) \quad (4)$$

$$u_2 = \omega_3^2 - \omega_2^2 = \frac{\omega_0^2}{f^2} (z_3^2 - z_2^2) = \frac{\lambda}{\pi f} d(z_2 + z_3) = \frac{\lambda}{\pi f} d(2z_2 + d) \quad (5)$$

可得:

$$u_2 - u_1 = \omega_3^2 + \omega_1^2 - 2\omega_2^2 = \frac{2\lambda}{\pi f} d^2 \quad (6)$$

$$u_2 + u_1 = \omega_3^2 - \omega_1^2 = \frac{2\lambda}{\pi f} dz_2 \quad (7)$$

进而推导出:

$$\frac{\lambda}{\pi f} = \frac{\omega_3^2 + \omega_1^2 - 2\omega_2^2}{2d^2} \quad (8)$$

$$z_2 = \frac{\pi f (\omega_3^2 - \omega_1^2)}{4\lambda d} \quad (9)$$

已知 z 方向的相邻光斑间距 d ,只需测出光斑半径 ω_1 以及 ω_3 后,可以计算出第二个光斑在轴向 z 方向上距离束腰的距离 z_2 ,文中称为离焦量 z_2 ,调节整形光路,得到理想的光斑结果。

2 实验

2.1 实验装置

按照理论模型建立如图 2 所示的实验光路,其中扩束凸球面镜和准直凹球面镜置于离焦位置,并小角度放置,此球面镜镜架底部安装有电动平移台,

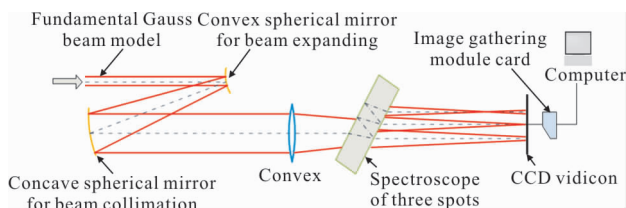


图 2 三光斑分光系统实验光路图

Fig.2 Experimental setup for beam splitting system based on three spot sizes

可前后移动,以调整扩束后的发散会聚度。He-Ne 光经过由扩束凸球面镜和准直凹球面镜组成的扩束整形系统后变为口径较大的光束,然后经由凸透镜聚焦后以入射角 15° 入射到三光斑分光镜上,该分光镜厚度为 8.5 mm,两面皆镀有反射率为 96% 的反射膜,此时,因光束在分光镜内的多次反射和透射,可在 CCD 探测器上测量到一排光斑,其强度分别为:

$$I_1 = I \cdot (1-R)^2 = I \cdot (1-96\%)^2 = 0.0016I \quad (10)$$

$$I_2 = I \cdot (1-R)^2 \cdot R^2 = I \cdot (1-96\%)^2 \cdot (96\%)^2 = 0.001475I$$

$$I_3 = I \cdot (1-R)^2 \cdot R^4 = I \cdot (1-96\%)^2 \cdot (96\%)^4 = 0.001359I$$

经过分光镜透射的光辐照在 CCD 探测器上, CCD 探测器的靶面尺寸为 8.8 mm×6.6 mm,取前三个光斑,其中 CCD 探测器靶面第二个光斑到透镜的光程为透镜的焦距,将采集到的图像经计算机进行处理。

引起强激光的发散会聚度变化的因素很多,文中以 He-Ne 光通过离焦放置的扩束凸球面镜和准直凹球面镜来产生一定量的发散会聚度,可以很大程度上代表强激光的情况。

2.2 实验数据及分析

利用三光斑系统获得高斯光束束腰附近的三个光斑,并设定其位置分别为 z_1 、 z_2 、 z_3 , z 相邻方向的光斑间距 d 为 8.64 mm,光斑的半径分别为 ω_1 、 ω_2 、

ω_3 ,靶面上光斑之间距离约为 2.96 mm;在激光器工作过程中,计算机采集到图像信号,对于得到的三光斑的每一帧图像,实时监测三光斑的光斑半径 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的值,进而计算出真实的光束离焦量 z_2 的值。

已知 z_2 是第二个光斑在 z 方向距离束腰位置的距离,针对具体的整形光路,根据在不同时刻的离焦量 $z_2(t)$ 实时计算出该方向调焦量并据此确定整形镜片间距的调整量。通过计算机控制电动平移台动态微调各镜片的位置,实时地实现该方向上的离焦补偿,提高光束质量,获得理想的远场光斑。当光束发散角为负,则需要减小扩束凸球面镜和准直凹球面镜之间的距离;当光束发散角为正,则需要增加扩束凸球面镜和准直凹球面镜之间的距离,由此即可实现闭环校正。

未经校正时,由三光斑系统输出的光斑如图 3 所示,从图中可以看出,三个光斑的大小不一,且光斑半径依次减小,很明显第二个光斑不在光束的束腰位置,可以判断此时的光束发散角为正,需要通过调节整形系统进行校正。根据计算得到需要调整的离焦量为 (4.9 ± 0.2) mm,控制电动平移台,扩大扩束凸球面镜和凹球面镜之间的距离,进行离焦补偿,得到光束校正后的三光斑如图 4 所示。

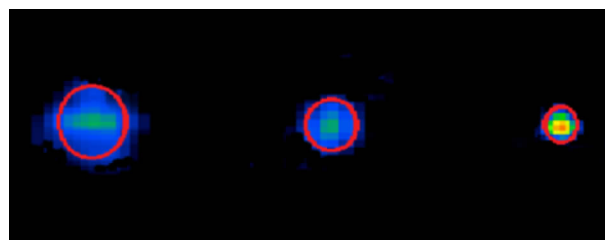


图 3 光束校正前三光斑图

Fig.3 Three spots before beam correction

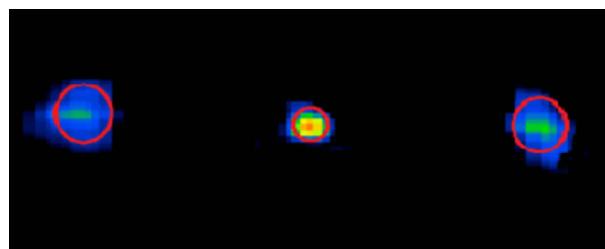


图 4 光束校正后三光斑图

Fig.4 Three spots after beam correction

从图 4 中可以看出,第二个光斑的尺寸明显小

于第一个和第三个光斑,且第一个和第三个光斑的尺寸非常接近,此时第二个光斑位于光束的束腰位置,且校正后的光斑离焦量为 (0.3 ± 0.1) mm,近乎于零。

图 5 是光束校正前后的离焦量对比图,从图中可以发现光束离焦量从 (4.9 ± 0.2) mm 整形校正后到离焦量为 (0.3 ± 0.1) mm,光束离焦量校正的效果很好,此时获得的光斑图像可以忽略离焦量的影响。

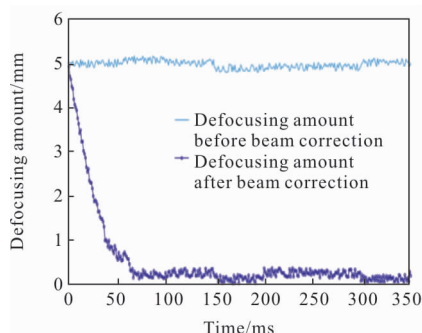


图 5 光束校正前后离焦量对比图

Fig.5 Defocusing amount comparison before and after beam correction

2.3 分析与讨论

通过三光斑系统实时检测光斑半径,可以得到未校正的三光斑半径值,并经由精确计算后得出光束的离焦量为 (4.9 ± 0.2) mm,据此进行动态调焦补偿,通过调节整形光路进行光束离焦补偿,得到校正后的三光斑图,并计算出此时的光束的离焦量为 (0.3 ± 0.1) mm。根据光束校正前后离焦量的对比图,可以发现光束通过动态调焦后离焦量的校正结果很好,达到预期目标。

3 结论

文中提出了激光束三光斑离焦量实时检测的方法,根据基模高斯光束建立理论模型,并得出三光斑模型中光束离焦量与光斑尺寸之间的关系。通过实时检测三光斑各自的半径,精确计算出光束的离焦量,为动态调焦补偿提供可靠的依据。在实验中根据计算出的离焦量进行闭环校正得到良好的光斑图,验证了该方法的正确性与可行性,从而保证激光光束在目标上的良好聚焦和辐照效果,提供了一种实时检测强激光热畸变离焦量的方法,该方法同样适

用于非稳腔激光器。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Guo Ruhai, Chen Ning, Shi Kui, et al. Simulations and experiments on optical inner-channel thermal deformation for high-power laser system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2925-2930. (in Chinese)
郭汝海,陈宁,时魁,等.高功率激光系统中内光路热变形的仿真及实验研究[J].*红外与激光工程*, 2013, 42(11): 2925-2930.
- [3] Guo Jianzeng, Liu Tiegeng, Wang Zhenhua, et al. Method for lower order aberration correction based on beam shaping [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(8): 1797-1800. (in Chinese)
郭建增,刘铁根,王振华,等.基于整形光路的低阶像差校正方法[J].*强激光与粒子束*, 2012, 24(8): 1797-1800.
- [4] Zhao Haitao, Wang Zhenhua, Wei Chengpu, et al. Detection of defocus length based on optical modulator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1839-1842. (in Chinese)
赵海涛,王振华,韦承甫,等.基于光学调制的离焦探测技术[J].*强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1839-1842.
- [5] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Deng Huarong, et al. Experiment of laser ranging to space debris by using two receiving telescopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0102002. (in Chinese)
张忠萍,张海峰,邓华荣,等.双望远镜的空间碎片激光测距试验研究[J].*红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0102002.
- [6] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)
高铎瑞,李天伦,孙悦,等.空间激光通信最新进展与发展趋势[J].*中国光学*, 2018, 11(6): 901-913.
- [7] Wen Ya, Wu Chunting, Yuan Zerui, et al. Research progress of far-infrared solid-state lasers [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 889-900. (in Chinese)
温雅,吴春婷,袁泽锐,等.远红外固体激光器研究进展

- [J]. 中国光学, 2018, 11(6): 889–900.
- [8] Chen Minghui, Jia Wenyu, He Jintao, et al. Development of swept source based on dual filtering[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2355–2362. (in Chinese)
陈明惠, 贾文字, 何锦涛, 等. 双重滤波扫频光源的研制[J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2355–2362.
- [9] Yang Juqing, Wang Dayong, Dong Dengfeng, et al. Laser measurement based evaluation for orthogonal transformation calibration of robot pose [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26 (8): 1985–1993. (in Chinese)
杨聚庆, 王大勇, 董登峰, 等. 激光测量标定机器人坐标系姿态变换的正交化解算 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1985–1993.
- [10] Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Yu Xin, et al. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 1–5. (in Chinese)
周仁忠, 阎吉祥, 俞信, 等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 1–5.
- [11] Mukai R, Wilson K, Vilnrotter V. Application of genetic and gradient descent algorithms to wave-front compensation for the deep-space optical communications receiver [R]. The Interplanetary Network Progress Report 42–161, 2005.
- [12] Xi F J, Jiang Z F, Xu X J, et al. High-diffractive-efficiency defocus grating for wavefront curvature sensing [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(11): 3444–3448.
- [13] Hardy J W, Lefebvre J E, Koliopoulos C L. Real-time atmospheric compensation [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 67(3): 360–369.
- [14] Roddier F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 1988, 27: 1223–1225.
- [15] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. Principle of Laser[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 70–72. (in Chinese)
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理 [M]. 第 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2010: 70–72.