

激光缩束系统波前畸变精度分析

赵建科, 李霞, 徐亮, 段亚轩

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 对大科学工程激光参数系统中的激光缩束系统各项装调误差进行了分析, 缩束系统中组合物镜系统和目镜系统离焦误差对于系统波前畸变影响最大, 并对不同离焦量产生的波前畸变 PV 值进行了分析, 得到缩束系统波前畸变的变化与系统物镜和目镜离焦量并非线性关系。采用大孔径长焦距平行光管、光纤激光器和哈特曼传感器组成激光波前测试系统对激光缩束系统的波前进行实时测量和验证, 经过波前计算机辅助技术, 使其技术参数达到了波前畸变 PV 值优于 $0.2\lambda(\lambda=1.053\ \mu\text{m})$ 的要求。

关键词: 激光参数测量; 缩束系统; 波前畸变; 哈特曼传感器; 光纤激光器

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0079-05

Laser beam wave-front error reduction accuracy analysis

Zhao Jianke, Li Xia, Xu Liang, Duan Yaxuan

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In the laser parameters systems of big science projects, the installation errors of the shrink-beam system were analyzed. The result shows that the defocus between the objective lens system and the eyepiece system affects the wavefront distortion error of the system most. Besides, the PV values of the wavefront aberration caused by the defocus between the objective lens system and the eyepiece system of the shrink-beam system were analyzed and a conclusion that there was a non-linear relationship between the PV values and the defocus was drawn. By the test system composed of large aperture long focal length collimator, fiber lasers and Hartmann wavefront sensors, the wavefront aberration of the laser shrink-beam system was measured and verified real-time. The result shows that by wavefront computer-aided technology, the PV values of wavefront aberration can be less than $0.2\lambda(\lambda=1.053\ \mu\text{m})$.

Key words: laser parameter measurement; shrink-beam system; wave-front distortion; Hartmann sensor; fiber lasers

0 引言

在国内外高功率大型激光器的运行中, 如何运用特殊测量装置准确测量激光器的各项参数, 并对激光器运行各阶段的特性进行分析处理, 以保证高功率大型激光器能安全、稳定、高效地运行, 是各国科学家一直奋斗的目标。目前, 国外只有为数不

多的几个国家进行过此项试验, 但对于运用何种技术和装置对于激光参数进行测量, 还没有相关文献报道。文中描述的激光参数测量系统主要针对我国大科学工程中应用研究的高功率大型激光器, 其主要功能是在装置运行发射期间, 完成各子束关键位置的激光参数包括能量参数、时间参数、功率参数、光束质量参数的测量^[1-2]。

收稿日期: 2012-05-13; 修订日期: 2012-06-16

基金项目: 神光 III 大科学工程项目资助课题

作者简介: 赵建科(1975-), 男, 研究员, 主要从事光学测试技术方面的研究。Email: zjk@opt.ac.cn

参数测量装置中光束质量测量是系统研制的关键,其由衰减板、分光镜、激光缩束系统及哈特曼传感器组成。通过取样镜得到 50 mm×50 mm 的平行激光光束,光束经过衰减板和分光镜进入激光缩束系统后用哈特曼传感器测量光束波前畸变^[3-10]。

由于光束通过衰减板、分光镜、缩束系统都会带入像差,需将各部分像差进行标定,然后行校正。系统中衰减板和分光镜是平面镜,其波前畸变通过目前的加工水平可以达到很高,因此主要的影响是缩束系统。

1 激光缩束系统设计

激光缩束系统光学设计的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Tab.1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Object lens focal F_1	1 300 mm
Eye lens focal F_2	143 mm
Aperture of input beam	50 mm×50 mm
Aperture of output beam	5.5 mm×5.5 mm
Distortion of the system wave	$PV < 0.2\lambda (\lambda = 1.053 \mu\text{m})$

激光缩束系统光路图如图 1 所示。



图 1 激光缩束系统光学设计图

Fig.1 Optical layout of the shrink-beam system

2 装调产生的波前畸变分析

2.1 缩束系统装调要求

为了满足系统波前 PV 值优于 0.2λ 的要求,缩束系统的物镜和目镜的装配要求如表 2 所示。

表 2 光学系统装调公差

Tab.2 Assembly tolerance of optical system

Parameter	Value
System concentricity	<0.03 mm
Bank error	<1'
Confocal error between the objects	<0.02 mm
Focal error of the object lens	<0.3%

2.2 缩束系统波前计算机辅助装调

为了使系统像差满足设计要求,对缩束系统的物镜组和目镜组分别对心装配。对于系统组合采用波前计算机辅助装调系统实时监控、调整离焦量、偏心量和应力变形。该辅助装调系统由大口径长焦距准直镜、光纤激光器和哈特曼传感器组成,光路图如图 2 所示。其中光纤激光器和准直镜主要提供波面为平面波的准直激光束。

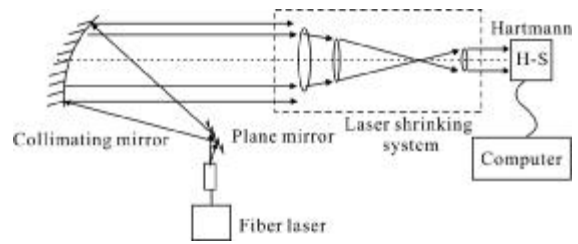


图 2 缩束系统波前计算机辅助装调示意图

Fig.2 Layout of computer aided installation for the shrink-beam system

2.3 缩束系统激光传输模型分析

根据激光传输理论,用 q 参数来研究高斯光束传输^[10-11]。首先依据 q 参数,定义在光纤束腰位置 z=0 处的 q_0 为:

$$q_0 = q(0) = i \frac{\pi W_0^2}{\lambda} \tag{1}$$

光纤束腰位置离准直镜 (z=l) 处,设激光参数为 q_A ,则

$$q_A = q_0 + l \tag{2}$$

通过准直镜后,在紧贴镜面处,设激光参数为 q_B ,则

$$\frac{1}{q_B} = \frac{1}{q_A} - \frac{1}{F} \tag{3}$$

式中:F 为准直镜的焦距。

在距离准直镜镜面 l_c 处,设激光参数为 q_c ,则

$$q_c = q_B + l_c \tag{4}$$

将公式(1)-(3)带入公式(4)计算可得 q_c 为:

$$q_c = l_c + F \frac{l(F-l) - (\frac{\pi W_0^2}{\lambda})^2}{(F-l)^2 + (\frac{\pi W_0^2}{\lambda})^2} + i \frac{F^2 (\frac{\pi W_0^2}{\lambda})}{(F-l)^2 + (\frac{\pi W_0^2}{\lambda})^2} \tag{5}$$

如 q_c 在像方束腰位置,则波前曲率半径 $R_c \rightarrow \infty$, q_c 的实部和虚部分别为:

$$\text{Re} \left\{ \frac{1}{q_c} \right\} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{1}{w_0'} = -\frac{\pi}{\lambda} \operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{q_c} \right\} \quad (7)$$

将公式(6)、(7)带入公式(5)可得到:

$$l_c = F + \frac{(l-F)F^2}{(l-F)^2 + \left(\frac{\pi w_0}{\lambda}\right)^2} \quad (8)$$

$$w_c'^2 = \frac{F^2 w_0^2}{(F-l)^2 + \left(\frac{\pi w_0}{\lambda}\right)^2} \quad (9)$$

$$\theta_c' = \frac{\lambda}{\pi w_c'} \quad (10)$$

式中: w_0 为光纤激光器的束腰半径; l 为光纤激光束腰位置与准直镜的距离; θ_c' 为经准直镜准直后激光在 C 点的发散角; w_c' 为经准直镜准直后激光的束腰半径; l_c 为经准直镜准直后激光的束腰位置。

当光纤激光器束腰位置位于准直镜焦点, 即 $l=F$ 时, 通过准直镜后激光器的束腰半径, 准直发散角和位置分别为:

$$w_0' = \frac{\lambda}{\pi w_0} F \quad (11)$$

$$z_0 = F \quad (12)$$

$$\theta_c' = \frac{w_0 \lambda}{F} \quad (13)$$

由公式(11)~(13)可知, 准直后的激光束腰半径、束腰位置和发散角与准直镜的焦距有关。图 2 采用的光纤激光器束腰半径为 $3 \mu\text{m}$, 波长为 $1.053 \mu\text{m}$, 准直镜口径为 450mm , 焦距为 5000mm , 通过公式(11)~(13)计算经过准直后激光的腰斑半径为 559mm , 束腰位置距准直镜 5000mm 处, 发散角为 $0.12''$, 可以忽略不计, 此时波前曲率半径 $R_c \rightarrow \infty$, 此装置准直后的激光束波前可以认为是平面波。

依照上述推导计算激光通过缩束系统的变化, 为了方便, 将缩束系统分为物镜组件和目镜组件, 物镜组的焦距为 F_1 , 口径为 D_1 , 目镜组的焦距为 F_2 , 口径为 D_2 。经缩束系统物镜组后, 假设 $l_1 \geq F_1$, 则按照公式(8)、(9)计算腰斑半径 w_1 、束腰位置 l_1 为:

$$w_1 \approx \frac{\lambda}{\pi w_0} F_1 \quad (14)$$

$$l_1 \approx F_1 \quad (15)$$

再经过目镜后, 按照公式(8)、(9)计算激光束腰

斑位置 l_2 、腰斑大小 w_2 , 物镜组与目镜组离焦距离为 Δl 。

$$l_2 = F_2 + \frac{(F_2 + \Delta l - F_2)F_2^2}{(F_2 + \Delta l - F_2)^2 + \left(\frac{\pi w_1}{\lambda}\right)^2} = F_2 + \frac{\Delta l F_2^2}{\Delta l^2 + \left(\frac{\pi w_1}{\lambda}\right)^2} \quad (16)$$

$$w_2^2 = \frac{F_2^2 w_1^2}{(F_2 - \Delta l + F_2)^2 + \left(\frac{\pi w_1}{\lambda}\right)^2} = \frac{F_2^2 w_1^2}{\Delta l^2 + \left(\frac{\pi w_1}{\lambda}\right)^2} \quad (17)$$

将公式(14)代入公式(16)、(17)得:

$$l_2 = F_2 + \frac{\Delta l F_2^2}{\Delta l^2 + \left(\frac{\lambda F_1}{\pi w_0}\right)^2} \quad (18)$$

$$w_2^2 = \frac{F_2^2 \left(\frac{\lambda}{\pi w_0} F_1\right)^2}{\Delta l^2 + \left(\frac{\lambda F_1}{\pi w_0}\right)^2} \quad (19)$$

假定哈特曼传感器距离束腰位置为 l_3 , 传感器探测面半径为 R_0 , 则传感器测量得到的腰斑半径 $w_3(l)$ 和波前畸变 ΔR 为:

$$w_3(l) = w_2 \left[1 + \left(\frac{\lambda l_3}{\pi w_2}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$R(l) = l_3 \left[1 + \left(\frac{\pi w_2}{\lambda l_3}\right)^2 \right] \quad (21)$$

$$\Delta R = R(l) - \sqrt{R^2(l) - R_0^2} \quad (22)$$

由公式(18)、(19)可知, 激光经过缩束系统后的束腰半径, 腰斑位置不仅与物镜组、目镜的焦距有关系, 而且与物镜和目镜的离焦量 Δl 有关。

(1) 当 $\Delta l=0$ 时, 束腰位置在目镜像方焦点 F_2 处, 此时的腰斑大小为 $w_{02} = F_2 / F_1 w_1$, 此时 $R_2 \rightarrow \infty$, 波前接近于平面波;

(2) 当 $\Delta l > 0$ 时, 束腰位置将处在像方焦点 F_2 之外, 腰斑大小随 Δl^2 呈非线性变化。

假设 $l_3 \rightarrow 0$ 但不为零, 哈特曼固定在束腰附近某一位置, 此时缩束系统波前畸变 ΔR 随离焦量 Δl 变化曲线如图 3 所示。

假设 $\Delta l \rightarrow 0$, 由以上推论(1)可知, 改变哈特曼传感器和缩束系统目镜位置 $l_{目}$ 之间的距离, 缩束系统波前畸变 ΔR 始终为零。

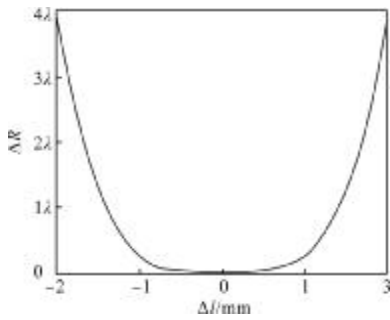


图 3 缩束系统波前畸变随物镜和目镜系统离焦量变化曲线

Fig.3 Curve of the wavefront aberration as a function of the defocus between the objective lens system and the eyepiece system of the shrink-beam system

当 Δl 在 2 mm 之内变化时, 改变哈特曼传感器位置, 缩束系统波前畸变 ΔR 随哈特曼传感器距离缩束系统目镜位置 l_3 变化曲线如图 4 所示。

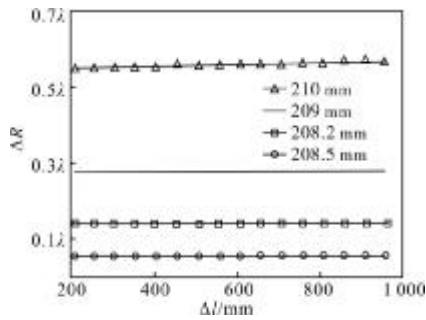


图 4 系统波前畸变随哈特曼距目镜位置变化曲线

Fig.4 Curves of the wavefront aberration as a function of the distance between Hartmann wavefront sensors and the eyepiece system

假设哈特曼距离束腰的位置 l_3 与离焦量 Δl 都不为零, 此时缩束系统波前畸变随哈特曼的距离 l_3 与离焦量 Δl 变化曲线如图 5 所示。

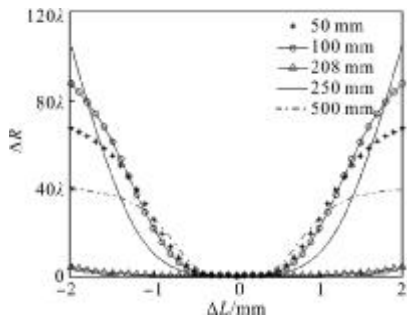


图 5 系统波前畸变随离焦量与哈特曼距离目镜位置变化曲线

Fig.5 Curves of the wavefront aberration as a function of the defocus and the distance between the Hartmann wavefront sensors and the eyepiece system

经分析可以得出以下结论:

(1) 缩束系统物镜组与目镜组离焦量的变化对于系统波前畸变影响非常大, 而哈特曼传感器的位置对于波前畸变影响比较小。

(2) 在目镜组像方焦点位置附近, 波前畸变随离焦量变化缓慢, 离开此位置, 波前畸变迅速变大。由此通过波前畸变的变化来指导装调, 可以严格控制物镜组和目镜组的离焦量和同心度。

3 实验结果

按照图 2 所示装置测量系统对激光缩束系统进行了实时装调测试, 不同条件下测量结果分别如图 6~8 所示。

图 6 为哈特曼传感器约在缩束系统后 $l_3=150$ mm

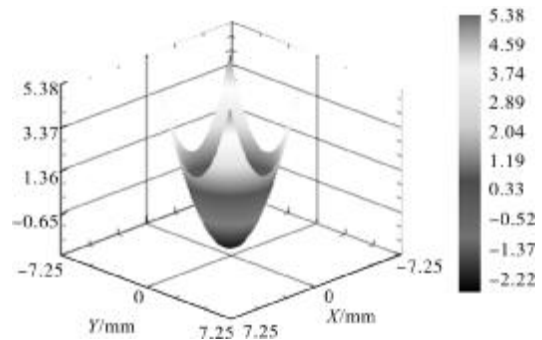


图 6 缩束系统波前畸变($l_3=150$ mm, $l_3=0.7$ mm)

Fig.6 Wavefront aberration of the shrink-beam system ($l_3=150$ mm, $l_3=0.7$ mm)

处、系统离焦量为 $l_3=0.7$ mm 时, 测量的系统波前畸变。

图 7 为哈特曼传感器约在缩束系统后 $l_3=150$ mm 处、系统离焦量为 $l_3=0.3$ mm 时, 测量的系统波前畸变。

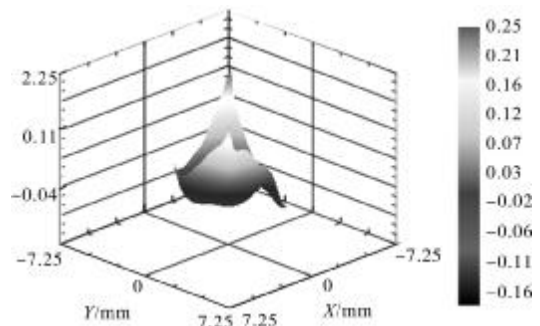


图 7 缩束系统波前畸变($l_3=150$ mm, $l_3=0.3$ mm)

Fig.7 Wavefront aberration of the shrink-beam system ($l_3=150$ mm, $l_3=0.3$ mm)

图8为哈特曼传感器约在缩束系统后 $l_3=150\text{ mm}$ 处、系统离焦量为 $l_3=0.03\text{ mm}$ 时,测量的系统波前畸变。

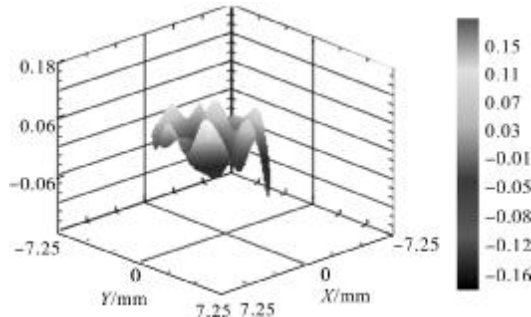


图8 缩束系统波前畸变($l_3=150\text{ mm}$, $l_3=0.03\text{ mm}$)

Fig.8 Wavefront aberration of the shrink-beam system
($l_3=150\text{ mm}$, $l_3=0.03\text{ mm}$)

由图6~8测量结果可知,当缩束系统物镜组和目镜组离焦量达到 0.7 mm 左右时,波前畸变PV值达到 8λ ($\lambda=1.053\text{ }\mu\text{m}$);当离焦量达到 0.03 mm 左右时,波前畸变PV值已经减小为 0.2λ ($\lambda=1.053\text{ }\mu\text{m}$)。由此可以得出缩束系统物镜组和目镜组离焦量对系统波前畸变影响最大,此结果也证明了上述模型理论分析是正确的。

4 结论

通过对激光缩束系统波前畸变在线计算机辅助装调与测试,可以得出以下结论:

(1) 影响缩束系统波前畸变最大的因素是离焦误差,即物镜组与目镜组离焦变化量。在实际装调中,只要将哈特曼传感器放置在目镜组像方焦点上、缩束系统离焦量控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 之内,波前畸变即可满足PV值为 0.2λ ($\lambda=1.053\text{ }\mu\text{m}$)的要求。

(2) 缩束系统波前畸变中像散和慧差的影响,其中像散在装调中可以通过微应力装夹来解决,慧差可以对物镜组和目镜组采用同轴对心加工来解决。从测试结果中可以看出此误差为小量,证明此方法有效可行。

(3) 哈特曼传感器的接收位置对于波前畸变的测量有一定的影响,对激光传输的束腰位置影响较

小;如果偏离其束腰位置,需严格限制缩束系统离焦量的变化范围,这样可以提高装调的精度,但增加了成本。

参考文献:

- [1] Sacks R, Auerbach J, Bliss E, et al. Application of adaptive optics for controlling the NIF laser performance and spot size [C]//Third Annual International Conference on Solid State Lasers for Application(SSLA) to Inertial Confinement Fusion (ICF), 1998.
- [2] Lv Baida, Ji Xiaolin, Luo Shirong, et al. Parametric characterization of laser beams and beam quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 14-17. (in Chinese)
- [3] Gao Wei, Wang Yunping, Li Bin. Study on characterization and diagnosis of high-power laser beam quality [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 52-56. (in Chinese)
- [4] Albert O, Sherman L, Mourou G, et al. Smart microscope: an adaptive optics earning system for aberrat ion correction in multiphot on confocal microscopy [J]. Opt Lett, 2000, 25 (1): 52-54.
- [5] Zhang Y D, Yang Z P, Duanetal H F. Characteristics of wavefront aberration in the single beam prin ciple prototype of the next generation ICF system [C]//SPIE, 2002, 4825: 249-256.
- [6] Cubalchini R. Modal wave -front estimation from phase derivative measurements [J]. J Opt Soc Am, 1979, 69(7): 972-977.
- [7] Williams W H, Auerbach J M, Henesian M A, et al. modeling characterization of the national ignition facility focal spot [C]//SPIE, 1998, 3264: 93-04.
- [8] Spaeth M L, Manes K R, Widmayer C C, et al. National ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. Opt Eng, 2004, 43(12): 2854-2865.
- [9] Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei, et al. Calibration of Hartmann Shack sensor for measurement of wavefront inprototype system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1413-1416. (in Chinese)
- [10] Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin, et al. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(10): 895-899. (in Chinese)