

应用于环形激光束的低阶哈特曼波前传感器设计

冯亚飞, 韦承甫, 刘现魁, 任晓明, 王振华, 孟昭荣

(中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027)

摘要: 针对高能化学激光器出光过程中存在着大比例、大 PV 值低阶像差这一现象, 设计了专用于前 5 项 Zernike 像差检测的低阶哈特曼波前传感器。该传感器的透镜部分采用呈环形分布的 6 单元微透镜阵列与凸透镜组合的方法, 且均用 CaF_2 材料制作。该方法不仅可以同时用于可见光和红外光的低阶像差测量, 还具有成本低、光路结构简单、探测范围大等优点, 适用于环形激光束的大 PV 值低阶像差检测。之后还搭建了测试光路系统, 测试结果表明, 该低阶哈特曼波前传感器的波面测量 PV 值量程为 $\pm 8\lambda$ ($\lambda=3.39 \mu\text{m}$), 测量精度优于 $\lambda/10$ ($\lambda=3.39 \mu\text{m}$)。

关键词: 哈特曼波前传感器; 低阶像差; 高能激光; 波前畸变

中图分类号: TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210016

Design of low-order Hartmann-Shack wavefront sensor for annular laser beam

Feng Yafei, Wei Chengfu, Liu Xiankui, Ren Xiaoming, Wang Zhenhua, Meng Zhaorong

(The 718 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Handan 056027, China)

Abstract: Based on the fact that there were a large percentage of low-order aberrations which had large PV values in high-energy laser beam, a Hartmann-Shack wavefront sensor for measuring first five-order Zernike aberrations was presented and designed. The lens part of the sensor adopted a method with combination of a 6-units micro-lens array and a convex lens, and the micro-lens array was distributed in annular. Since the lens material of this sensor was CaF_2 , the designed sensor could be applied to the low-order aberrations measurement of visible and infrared laser beam. This method had the advantages of low cost, simple structure and large detection range, which was suitable for the measurement of large PV-value low-order aberrations of the annular laser beam. Afterwards, a measurement system for the low-order Hartmann-Shack wavefront sensor had been set up, and the results show that the measuring range was $\pm 8\lambda$ ($\lambda=3.39 \mu\text{m}$) and the accuracy was less than $\lambda/10$ ($\lambda=3.39 \mu\text{m}$).

Key words: H-S wavefront sensor; low-order aberration; high-energy laser; wavefront aberration

收稿日期: 2020-12-03; 修订日期: 2021-03-16

基金项目: 国家高技术发展计划 (51326010201)

作者简介: 冯亚飞, 男, 工程师, 博士, 主要从事激光技术方面的研究。

0 引言

在激光应用领域,激光的作用效果取决于传输到远场目标上的功率密度,而该密度又与光束的衍射极限倍数 β 因子密切相关。在激光的产生和传输过程中,有许多不可预知的扰动因素造成光束波前畸变,其中由于机械振动、光学元件热变形等因素引起的倾斜、离焦和像散等低阶像差占总像差的80%以上,是影响激光远场光束质量的重要因素^[1]。因此,如果能在激光器系统中快速、准确地测量光束的低阶像差,并依据测量结果实时调整控制系统抑制输出激光的低阶像差,则可极大地提高激光束的光束质量。

近30年来,波前探测一直伴随着自适应光学技术的发展而发展,并得到不断的丰富和更新。目前已经提出很多波前测量方法,比如基于干涉的波前传感器技术^[2]、基于曲率测量的波前传感器技术^[3]、基于焦面成像的波前传感器技术^[4]以及哈特曼波前传感器技术^[5]。其中,哈特曼波前传感器具有结构紧凑,光能利用率高和能工作于连续或脉冲目标光等诸多优点,已经在自适应光学、激光光束诊断、光学面形检测和人眼像差测量等不同领域得到了成功应用^[6-12]。

已知高能化学激光器在出光过程中通常存在着动辄数十微米的大PV值低阶像差^[1],而传统的哈特曼波前传感器往往着重于像差检测速率和精度的提高,为了适用于检测高能化学激光器出光过程中所存在的大PV值低阶像差,文中专门设计了一种新型低阶哈特曼波前传感器。首先分析了这种传感器在设计时应考虑的系统设计要求,然后介绍了该传感器的光路结构设计,最后搭建了测试系统对传感器性能进行了测试。该传感器能够准确、快速地检测环形激光束波前的前5项Zernike像差(X 倾斜、 Y 倾斜、 90° 像散、离焦和 45° 像散)^[13]。另外文中还将 CaF_2 材料应用于哈特曼波前传感器光学元件的制作,该传感器不仅具有成本低、光路结构简单、探测范围大等优点,还能同时应用于可见、近红外和中红外激光束的像差检测,大大扩展了传感器波段使用范围。

1 哈特曼波前传感器的设计指标要求

哈特曼波前传感器的主要设计指标有像差检测量程、检测精度和采样速率等。根据哈特曼波前传感器应用领域的不同,系统对这些指标的要求也有很大

的差别。在天文望远镜检验应用中,光源为星光,因此系统对传感器像差检测量程要求不高,对检测精度要求较高;在自适应光学领域,例如化学激光的光束净化和激光大气传输自适应光学技术,对于自适应光学系统非常重要的指标要求之一就是采样速率,通常系统中哈特曼波前传感器采样速率要求达到1 kHz以上^[14]。下面根据高能激光器输出光束的像差特性,对各项指标分别进行分析。

(1) 像差检测量程

在高能化学激光器出光过程中,由于平面镜、球面镜和柱面镜等光学元件受热变形,输出光束通常包含大量的像散和离焦等前5项Zernike像差,此时光束波前形状常常表现为不同PV值的 X 方向离焦和 Y 方向离焦组成的波面。因此,根据高能化学激光器出光时的实际情况,文中的像差检测量程定义不考虑高阶像差,而是以光束波前离焦PV值作为像差量程的定义。哈特曼波前传感器像差检测量程与其动态范围指标有紧密关系。动态范围描述的是可探测的局部最大波前倾斜量,其与微透镜子孔径尺寸成正比,与焦距成反比。根据参考文献^[1]报道,高能化学激光器在长时间出光过程中存在着PV值达到20 μm 以上的低阶像差,另外由于高能激光器光学性能参数监测系统的输入光束尺寸通常为 $\Phi 10\text{ mm}$,考虑到通用性,系统对哈特曼波前传感器的像差检测量程的指标要求为 $\pm 6\lambda$ ($\lambda=3.39\ \mu\text{m}$),可检测光束直径为 $\Phi 10\text{ mm}$ 。

(2) 像差检测精度

像差检测精度一方面与光斑质心定位精度有关;另一方面,对于相同尺寸的输入光束,微透镜阵列子孔径数目越多,像差检测精度越高。在自适应光学领域,由于高能化学激光器长时间出光的波前低阶像差变化较大,传统的基于高阶变形反射镜的像差校正方法由于校正量很小不再适用,此时更适合采用基于整形光路的低阶像差校正方法^[1],而此种方法对于像差检测精度要求相对较低。综合考虑,系统对哈特曼波前传感器检测精度的指标要求为 $\lambda/10$ ($\lambda=3.39\ \mu\text{m}$)。

(3) 采样速率

传感器采样速率一方面与相机有关,比如对于量子效率高的相机,其曝光时间可以缩短;另一方面与图像计算量有关,像素数越多,计算量越大,则速率越慢。由于高能激光器的低阶像差主要由光学元件热变形引起,其变化是一个相对缓慢的过程,因此系统

对传感器采样速率要求不高。

2 哈特曼传感器结构设计

2.1 总体方案设计

根据哈特曼波前传感器的动态范围定义,其与微透镜子孔径尺寸成正比,与焦距成反比,与检测精度成相互制约的关系。因此,为满足系统对传感器的大量程检测的指标要求,低阶哈特曼传感器的总体方案采用负微透镜阵列和凸透镜组合的方式,其结构示意图如图 1 所示。该传感器可实现绕过红外热像仪冷光阑的功能,以达到充分利用相机靶面进行成像的目的。与此同时,不同于传统哈特曼波前传感器微透镜阵列子孔径呈正方形分布,文中传感器的微透镜阵列采用圆对称环形分布,如图 2 所示,以此来更好地匹配高能激光领域中常见的环形激光束。为满足大量程检测要求,微透镜阵列子孔径数目设计为 6 单元,其尺寸为 $\Phi 3.3$ mm。

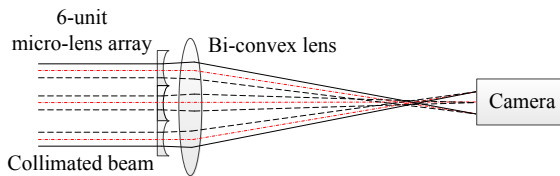


图 1 低阶哈特曼波前传感器的光路结构示意图

Fig.1 Light path structure of low-order Hartmann-Shack wavefront sensor

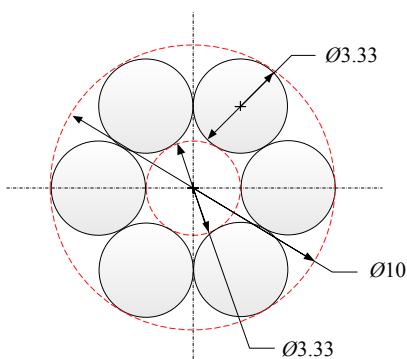


图 2 6 单元微透镜阵列分布示意图

Fig.2 Distribution diagram of 6-units micro-lens array

2.2 材料选取与光学参数设计

在哈特曼波前传感器应用中,目前最常见的微透镜阵列材料有两种,分别为紫外熔融石英和硅材料,其透射光谱范围如表 1 所示。而高能化学激光器的波长更多的处于 $2.6\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 的中红外波段范围内,因

此,基于紫外熔融石英材料的微透镜阵列无法应用于中红外波段的检测。另一方面,基于硅材料的微透镜阵列虽然能满足中红外透射要求,却不透可见光波段,因此增加了传感器在实际应用时的光路调试复杂度。

根据表 1 所示, CaF_2 材料的透射光谱范围极宽,为 $180\ \text{nm}\sim 8.0\ \mu\text{m}$,并且具有高损伤阈值、机械稳定和环境稳定等特性,但非常遗憾的是其质地非常脆,无法加工百微米量级的微透镜阵列,这也是目前市面上还未出现基于 CaF_2 材料的微透镜阵列的原因。而文中所设计的微透镜阵列子孔径尺寸为 $\Phi 3.3\ \text{mm}$,可采用传统冷加工的方式制作基于 CaF_2 材料的微透镜阵列。因此,所设计的基于 CaF_2 材料的低阶哈特曼波前传感器在激光应用应用中,不仅能大大降低光路调试复杂度,而且还可同时应用于可见、近红外和中红外波段的光束像差检测。另外,在表 1 中,虽然 BaF_2 材料的透射光谱范围比 CaF_2 更宽,但由于其属于有毒材料,对眼睛、皮肤和上呼吸道均有强烈刺激作用,而且对环境有害,因此不适用于制作微透镜阵列。

表 2 为该传感器的光学参数。根据参考文献 [15]

表 1 常用光学材料的透射范围

Tab.1 Transmission range of usual optical materials

Material	Transmission range
UV fused silica	185 nm-2.1 μm
CaF_2	180 nm-8.0 μm
Silicon	1.2-8.0 μm
BaF_2	0.2-11 μm

表 2 低阶哈特曼传感器的光学参数

Tab.2 Optical parameters of low-order Hartmann-Shack sensor

Part	Item	Parameter
Negative micro-lens array	Material	CaF_2
	Sub-aperture diameter/mm	3.3
	Curvature radius/mm	-72.7
Convex lens	Center thickness/mm	3
	Material	CaF_2
	Front surface curvature radius/mm	36.2
Camera	Back surface curvature radius/mm	135.7
	Center thickness/mm	5
Camera	Pixel size/ μm	15
	Sensor size/ mm^2	9.6×7.7

中的几何光学理论,经仿真计算,传感器的光斑衍射极限半径为 $276\ \mu\text{m}$, 约为 18 个像素。另外,传感器透镜组的等效焦距为 $110.5\ \text{mm}$, 当输入光束为平行光束时其在相机靶面上的艾里斑分布图如图 3 所示,可知光斑最大间距为 $4\ \text{mm}$, 约为相机靶面尺寸的一半左右。

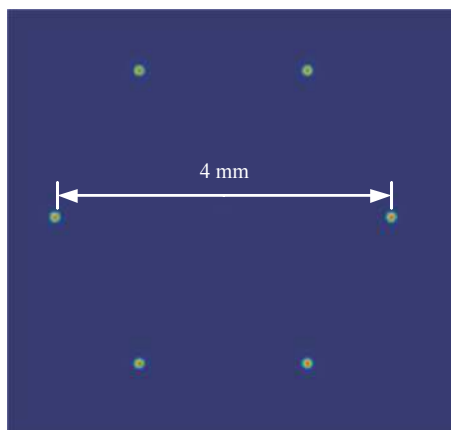


图 3 相机靶面上的光斑分布图

Fig.3 Spot distribution image on the camera

3 哈特曼波前传感器的性能测试

3.1 测试系统搭建

针对文中所设计的 6 单元低阶哈特曼波前传感器,在实验室搭建了哈特曼波前传感器的性能测试系统,如图 4 所示。在测试系统中,输入光束为 $3.39\ \mu\text{m}$ 的平行光束,其孔径尺寸为 $\Phi 140\ \text{mm}$,并经过一个 $100\ \text{mm}\times 35\ \text{mm}$ 的矩形光阑。另外,测试系统中的凹柱面镜安装在电动平移台上,通过计算机可实现凸柱面镜和凹柱面镜间距的自动控制。系统的测试原理主要是通过计算机控制凸柱面镜和凹柱面镜的间距变化来产生低阶像差 (90° 像散和离焦),同时利用文中所设计的低阶哈特曼波前传感器监测像差变化情况。由于该哈特曼波前传感器的可检测光束直径为 $\Phi 10\ \text{mm}$,测试系统光路中还需加入缩束器,其输入口径为 $\Phi 100\ \text{mm}$,缩束倍数为 10。图 5 为实际制作的基于 CaF_2 材料的低阶哈特曼波前传感器实物图。

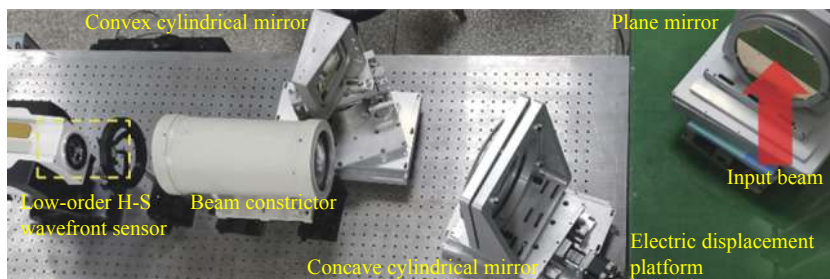


图 4 哈特曼波前传感器测试系统

Fig.4 Measurement system for Hartmann-Shack wavefront sensor



图 5 低阶哈特曼实物图

Fig.5 Physical picture of low-order Hartmann-Shack

3.2 测试结果分析与讨论

表 3 所示的为测试系统中的凸柱面镜和凹柱面镜的镜面参数。根据几何光学理论,测试系统中的凸柱面镜与凹柱面镜的共焦距离为 $435.17\ \text{mm}$,此时可实现光束平行进、平行出的功能,在此基础上距离每增加(或减小) $0.1\ \text{mm}$ 所对应的输出光束 PV 值变化为 $0.28\ \mu\text{m}$ 。图 6 所示的是系统中凸柱面镜和凹柱面镜的间距满足共焦条件时低阶哈特曼波前传感器所采集到的图像,该图像的焦斑分布情况与仿真计算的图 3 基本一致。另外在图 6 中,有个别的焦斑形态不规则,其原因可能有两方面:一方面是测试系统输入光束局部存在着高阶像差,另一方面是微透镜加工具

表 3 测试系统柱面镜参数

Tab.3 Parameters of the cylindrical mirror in the measurement system

Type	Curvature radius in the X-direction	Curvature radius in the Y-direction/mm	Size in the X-direction/mm	Size in the Y-direction/mm
Convex cylindrical mirror	$+\infty$	-453.1	100	35
Concave cylindrical mirror	$+\infty$	1293.37	100	100

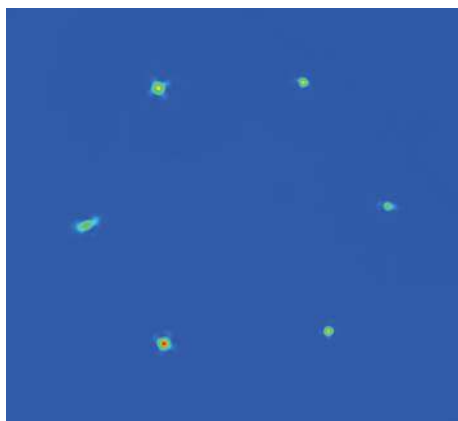


图 6 测试系统中采集到的光斑图像

Fig.6 Spot image acquired by the measurement system

有一定的误差所造成的。

为测试低阶哈特曼波前传感器的检测精度和量程,通过计算机以 0.01 mm 的步长逐步改变凸柱面镜与凹柱面镜的间距,获得了不同间距处哈特曼波前传感器测得的 PV 值,测试结果如图 7 所示。在图 7 中,红线为实测的 PV 值曲线,蓝线为根据几何光学理论计算的理论 PV 值曲线,两者的标准偏差为 0.1λ ,而且低阶哈特曼波前传感器的量程达到 $\pm 8\lambda$,两个指标均

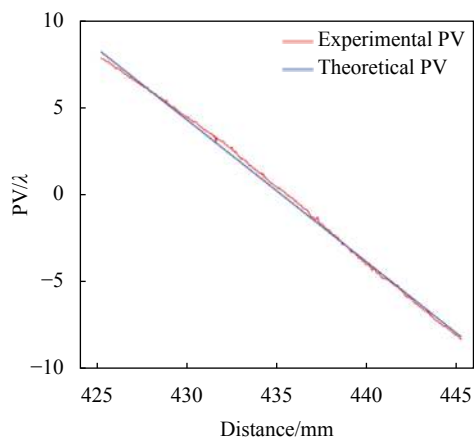


图 7 不同间距时的实测 PV 值曲线与理论 PV 值曲线

Fig.7 Actual PV curve and the theoretical PV curve at different distances

满足前面所述的系统设计的要求。由图 7 可知,实测 PV 值与理论 PV 值存在一定的偏差,经分析,其误差来源主要有以下三个方面:(1)低阶哈特曼中的负微透镜阵列和凸透镜存在一定的加工偏差;(2)测试系统中各光学元件之间的间距存在测量误差;(3)低阶哈特曼波前传感器阵列光斑的质心计算存在误差。

4 结 论

文中设计了基于 6 单元微透镜阵列的低阶哈特曼波前传感器,并搭建哈特曼波前传感器测试系统,对传感器的性能进行了测试分析。测试结果表明,文中所设计的低阶哈特曼波前传感器的波面测量 PV 值量程达到 $\pm 8\lambda$ ($\lambda=3.39 \mu\text{m}$),其测量精度优于 $\lambda/10$ ($\lambda=3.39 \mu\text{m}$),满足系统指标要求。在 高能化学激光器领域,由于其谐振腔通常采用非稳腔,其输出光束呈相应的方圆环形状,并且高能化学激光器在出光过程中存在着大量的低阶像差,而文中所设计的低阶哈特曼波前传感器除了具有能够同时实现可见激光束、近红外激光束和中红外激光束低阶像差的功能之外,还具有结构简单、成本低、算法简单和光路调试简单的优点,因此具有比较好的应用价值。

参考文献:

- [1] Guo Jianzeng, Liu Tiegen, Wang Zhenhua. Method for lower order aberration correction based on beam shaping [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(8): 1797-1800. (in Chinese)
- [2] Xu Xiaojun, Lu Qisheng, Liu Zejin. Comparison of wavefront reconstruction by lateral shear interferometer and hartmann wavefront sensor [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(3): 269-272. (in Chinese)
- [3] Roddier F. Curvature sensing and compensation: A new concept in adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 1988, 27: 1224-1225.
- [4] Jeong T, Do-kyeong K, Jongmin L. Method of reconstructing wavefront aberration from the intensity measurement [J]. *Optics*

- Letters*, 2007, 32(24): 3507-3509.
- [5] Zhao X, Xue D, Cheng Q. Research on Hartmann principle based on sub-aperture slope scanning detection and error [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0813003. (in Chinese)
- [6] Gong H, Agbana T E, Pozzi P, et al. Optical path difference microscopy with a Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2122-2125.
- [7] Deng Y, Zhao J, Dai Y, et al. Simultaneous quantification of longitudinal and transverse ocular chromatic aberrations with Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2018, 11(4): 1850021.
- [8] Tomy D S R, Stefan R, Dmitry K, et al. A Shack-Hartmann sensor for single-shot multi-contrast imaging with hard X-rays [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(5): 737.
- [9] Wang Jianli, Dong Yulei, Yao Kainan, et al. Three hundred and forty-nine unit adaptive optical wavefront processor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1007-1013. (in Chinese)
- [10] Wang Zhengxi, Zhang Bao, Li Xiantao, et al. Application of fast steering mirror in image motion compensation [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 95-105. (in Chinese)
- [11] Zheng Bin, Chen Yonghe, Fu Yutian. Co-focus error detection of segmented mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 26-33. (in Chinese)
- [12] Song Ding'an, Li Xinyang, Peng Zhenming. Application of 0-1 fault model in adaptive optics system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1111004. (in Chinese)
- [13] Mahajan V. Zernike circle polynomials and optical aberrations of systems with circular pupils [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(34): 8121.
- [14] Li Hongzhuang, Liu Xinyue, Wang Zhichen, et al. Develop of multi-application and modular Hartmann wavefront sensor [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 362-365. (in Chinese)
- [15] Shi Shunxiang, Zhang Haisong, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000: 380-390. (in Chinese)