

哈特曼波前分析仪校准方法研究

王艳萍^{1,2} 王茜茜¹ 马冲²

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081

²中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100013

摘要 在介绍哈特曼波前分析仪工作原理的基础上,分析了哈特曼探测器微孔阵列面与CCD面间距 L_H 参数校准的必要性,提出并讨论了用已知斜率的平面波校准 L_H 参数,并将平面波斜率值精确溯源至点光源位移量的校准方法。依据此校准方法,实际校准了一台哈特曼波前分析仪,给出了 L_H 参数的校准值。用校准过的哈特曼波前分析仪测量了三种不同曲率半径的球面波前,与软件构造的相同曲率半径的理想球面波前作比较,波前测量精度达 $\lambda/35$,波前像差PV值达 $\lambda/7$ 。该实验结果表明,哈特曼波前分析仪校准结果是准确的,校准方法是有效可行的。

关键词 测量; 校准方法; 波前测量; 自适应光学; 波前传感器; 哈特曼探测器; 哈特曼波前分析仪校准

中图分类号 TN247 文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0108003

Study on Hartmann Wavefront Analyzer Calibration Method

Wang Yanping^{1,2} Wang Qianqian¹ Ma Chong²

¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

²Division of Metrology in Optics and Laser, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

Abstract Based on the principle of Hartmann wavefront analyzer (HWA), the necessity of calibrating pinholes array to CCD spacing L_H is clarified. The method of calibrating L_H with known gradient plane wave, and tracing gradient value to the point source accuracy displacement, is presented and discussed. According to this calibration method, a HWA is calibrated and corrected value of L_H is given. The calibrated HWA measures three spherical wavefronts with different curvature radii. Compared to ideal spherical wavefronts, wavefront measurement accuracy is up to $\lambda/35$, and wavefront aberration peak-valley (PV) value is $\lambda/7$. The experimental results show that calibrated value of HWA is accurate, and given calibration method is effective and feasible.

Key words measurement; calibration method; wavefront measurement; adaptive optics; wavefront sensor; Hartmann sensor; Hartmann wavefront analyzer calibration

OCIS codes 120.3940; 010.1080; 140.3300

1 引 言

哈特曼波前测量技术凭借宽动态范围、部分相干光束适用、无频谱纯度要求、脉冲光可测以及可分辨 2π 整数倍相位信息等优势^[1],拥有广泛的应用领域。该技术早期应用于天文望远镜和高功率激光的自适应光学领域^[2-5],随着技术的发展完善,逐步扩展至大气扰动监测、人眼像差、激光光束质量、光学元件测试、光学系统准直等应用领域^[6-10]。随着哈特曼波前测量技术应用的不断深入,哈特曼波前分析仪的研制量和使用量逐年增加,其校准需求开始显现。

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-08-21

基金项目: 国家质检总局科技计划项目(2012QK346)

作者简介: 王艳萍(1982—),女,博士研究生,主要从事激光参数计量方面的研究。E-mail: wyp@nim.ac.cn

导师简介: 王茜茜(1970—),女,博士,副教授,主要从事光电子技术、激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: qqwang@bit.edu.cn

在介绍哈特曼波前分析仪工作原理的基础上,本文指出了微孔阵列面与 CCD 探测面间距 L_H 是哈特曼波前分析仪最基本的校准参数,重点提出了将 L_H 参数精确溯源至长度量的一种哈特曼波前分析仪自校准方法,并通过实验验证了该校准方法的有效、准确、可靠性。需要提及的是,研究的哈特曼波前分析仪校准方法,同样适用于哈特曼波前分析仪中微透镜阵列焦距的校准。

2 哈特曼波前分析仪工作原理

哈特曼波前分析仪是基于波前斜率测量的一种波前测量仪器,由哈特曼探测器和数据分析软件组成。哈特曼波前分析仪测量波前时,首先得到的是波前二维空间采样点上的斜率值,然后运用数据分析软件中的波前算法,将离散的波前斜率值重构为波前。

由哈特曼发明的哈特曼探测器,结构简单,可有效地获得波前斜率值。在具有采集光强功能的仪器前安装一个微孔阵列,构成哈特曼探测器。在测量较小空间区域的波前时,采集光强的仪器多用 CCD 相机。在 CCD 相机前安装微孔阵列时,其阵列面应与 CCD 探测面平行,阵列面与 CCD 探测面之间的距离应是一个较为准确的量值。

在哈特曼探测器测量波前斜率前,需要用参考波前确定各个微孔相对于 CCD 的位置。图 1(a)显示了哈特曼探测器探测平面波参考波前的过程:平面波垂直入射哈特曼探测器,通过微孔阵列;透过微孔的光斑落在 CCD 探测面上,探测面上各个衍射光斑的像点记录了微孔在 CCD 探测面上垂直投影的位置。为了便于数据分析,整个 CCD 探测面划分为若干个子区域,每个子区域对应一个微孔,通常子区域以微孔垂直投影点为中心划分。

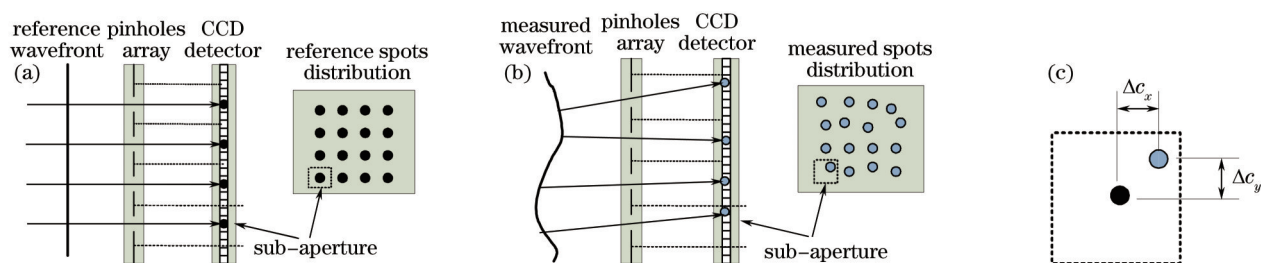


图 1 哈特曼探测器工作原理示意图。(a) 参考波前测量; (b) 被测波前测量; (c) CCD 子孔径内像点质心的偏移量

Fig.1 Schematic diagram of Hartmann sensor operation. (a) Detecting reference wavefront; (b) detecting measured wavefront; (c) spot centroid displacement in a single sub-aperture

测量被测波前时,由于其波前斜率相对于参考波前有所变化,通过微孔的光斑在 CCD 探测面上的像点相对于参考波前的像点有所偏移,见图 1(b),偏移量反映了波前在空间采样点处斜率的情况。为了准确计算偏移量,需要知道像点的质心位置,质心的算法是计算 CCD 子区域内像点功率密度分布的一阶矩。如图 1(c)所示,以第 i 行第 j 列 CCD 子区域 (i,j) 为例,平面波做参考波前,设参考波前落入子区域 (i,j) 的像点质心为 $(c_{xr}, c_{yr})_{i,j}$,像点功率密度分布为 $E_r(x,y)$,有

$$c_{xr} = \frac{\sum_{subap(i,j)} \sum E_r(x,y)x}{\sum_{subap(i,j)} \sum E_r(x,y)}, \quad c_{yr} = \frac{\sum_{subap(i,j)} \sum E_r(x,y)y}{\sum_{subap(i,j)} \sum E_r(x,y)}, \quad (1)$$

被测波前测量时,用同样方法计算出被测波前落入区域 (i,j) 像点的质心位置 $(c_{xt}, c_{yt})_{i,j}$,二维方向的质心偏移量即可得出

$$(\Delta c_x, \Delta c_y)_{i,j} = (c_{xt} - c_{xr}, c_{yt} - c_{yr})_{i,j}, \quad (2)$$

被测波前像点与平面波前像点质心的偏移量 $(\Delta c_x, \Delta c_y)_{i,j}$ 与被测波前在相应微孔采样点上的波前斜率值 $(g_x, g_y)_{i,j}$ 的关系为

$$(g_x, g_y)_{i,j} = (\Delta c_x / L_H, \Delta c_y / L_H)_{i,j}, \quad (3)$$

式中 L_H 为微孔阵列面与 CCD 探测面之间的距离,为叙述方便,将其简称为 L_H 参数。

波前通过微孔阵列,相当于对其进行二维空间采样,各采样点上的波前斜率值由上述方法得到。被测波前值则由波前斜率数据作为已知值,通过软件算法重构得出,常用的波前重构算法有区域法和模式法^[1]。

3 哈特曼波前分析仪校准方法

从第2节分析知道,哈特曼波前分析仪波前重构精确度取决于波前斜率值测量的准确度。而波前斜率值等于各子区域内像点质心偏移量除以针孔面与 CCD 探测面间的距离 L_H 。其中像点的质心偏移量通过测量直接得到,而针孔面与 CCD 探测面间的距离 L_H 参数,是哈特曼探测器安装时的一个近似估计值。因此,要想得到精确的波前斜率值, L_H 参数不能通过常规的长度测量手段获得,需要寻求一种有效的校准方法测量 L_H 参数。

哈特曼波前分析仪校准方法基本原理是:用已知斜率的平面波校准哈特曼探测器的 L_H 参数,平面波由点光源通过透镜构造,通过移动点光源的空间位置来获得倾斜的平面波前。由于点光源的位移是一个十分精确的量值,所以这是一种将倾斜平面波的倾角精确溯源至长度量值的方法^[12]。

图2显示了用上述方法校准哈特曼探测器 L_H 参数的示意图,点光源安装在精密调节架上,调节点光源的空间位置,构造出不同倾角的平面波波前,图2中平面波1与平面波2波前斜率的变化量与点光源位移量关系是

$$\Delta g = \Delta s / f, \quad (3)$$

式中 Δs 为点光源的位移量, Δg 为平面波波前斜率的变化量, f 为光学会聚系统焦距。

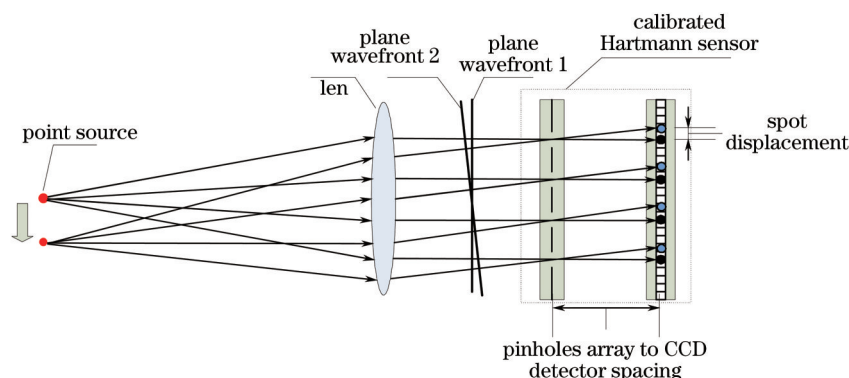


图2 哈特曼波前分析仪校准方法示意图

Fig.2 Schematic of Hartmann wavefront analyzer calibration method

根据哈特曼探测器工作原理,当哈特曼探测器分别测量平面波1波前、平面波2波前时,可以计算出平面波1、2落入 CCD 子区域 (i,j) 内的像点质心的偏移量 $\Delta c_{i,j}$ 。该偏移量与平面波1、2波前斜率的变化量 Δg 间的关系为

$$\Delta c_{i,j} = \Delta g \times (L_H)_{i,j}, \quad (5)$$

式中 $(L_H)_{i,j}$ 就是需要校准的 L_H 参数在相应子区域 (i,j) 位置的量值。

如果微孔阵列面与 CCD 探测面间的距离 L_H 在不同子区域位置的差别较小,不需要对 L_H 分区域校准,用 L_H 的平均校准值代表整个空间面上的 L_H 参数值即可。此时应先计算出平面波1、2入射哈特曼探测器时各像点的平均质心偏移量 $\overline{\Delta c}$:

$$\overline{\Delta c} = \sum \Delta c_{i,j} / N, \quad (6)$$

被校准的哈特曼探测器参数 L_H 值即可得出

$$L_H = \overline{\Delta c} / \Delta g. \quad (7)$$

4 实验与结果

4.1 哈特曼波前分析仪校准实验

实验依照第3节提出的哈特曼波前分析仪校准方法,对实际使用的哈特曼探测器的 L_H 参数进行定标。哈特曼探测器的性能参数见表1。

表1 哈特曼波探测器性能参数
Table 1 Hartmann sensor parameters

CCD effective area /mm ²	CCD resolution	CCD pixel size / μm	Pinhole diameter / μm	Pinhole spacing /mm
36.7×36.7	3056×3056	12	50	1.5

实验装置如图3所示,激光器采用光束质量良好且稳定的氦氖激光器,激光光束通过光纤准直器输入至单模光纤,单模光纤输出为点光源。单模光纤输出端固定在可以精确位移的光纤精密调节架上,输出端位置在光学会聚系统焦平面上,点光源出射的球面波经光学会聚系统形成平面波。

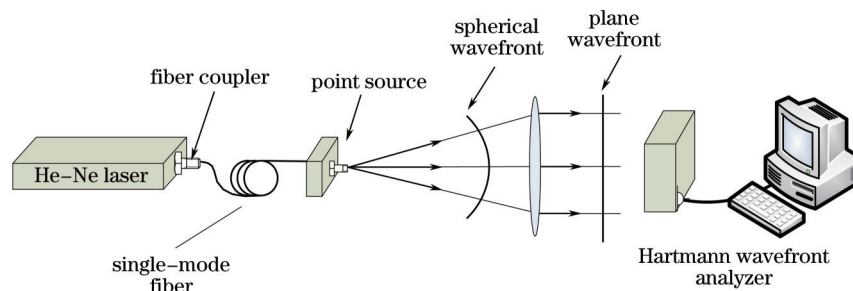


图3 哈特曼波前分析仪校准实验装置

Fig.3 Experimental setup for the calibration of a Hartmann wavefront analyzer

通过调节光纤精密调节架移动点光源,实验分别构造出波前斜率为15、-10、7.5、3.75 mrad四个平面波。被校哈特曼波前分析仪分别测量四个平面波,计算出平均质心偏移量,数据见表2,根据第3节中的校准(10)式,计算得出微孔阵列面与CCD探测面间距 L_H 。如表2中的校准数据所示,四个不同斜率平面波波前校准的 L_H 值,其标准偏差为0.64%,平均值为6.78 mm。

表2 哈特曼波前分析仪校准数据

Table 2 Hartmann wavefront analyzer calibration data

Incident wavefront gradient Δg /mrad	Mean centroid displacement $\bar{\Delta}c$ / μm	Pinholes array to CCD spacing L_H /mm
15	102	6.80
-10	-67.2	6.72
7.5	51.1	6.82
3.75	25.4	6.78

4.2 哈特曼波前分析仪校准方法验证实验

实验目的是验证上述哈特曼波前分析仪校准方法的有效可行性。验证实验设计为:用已校准的哈特曼波前分析仪测量曲率半径已知的球面波,用模式法重构波前,测得的波前经过斜率校正后,与软件模拟的具有相同曲率半径的球面波比较,计算波前像差,用三维(3D)图表示,并计算波前测量精度值和波前像差峰谷(PV)值。实验沿用4.1节中的点光源生成装置产生球面波,由于点光源与哈特曼波前分析仪探测面的距离可以精确测量,即球面波的曲率半径精确可知。

为了保证球面波波前正入射至哈特曼探测器,消除球面波带入的倾斜波前的成分,在原有4.1节中的实验装置上增加辅助的光路准直装置,这些装置包括激光器2,分光棱镜,全反射镜,如图4所示。在点光源与哈特曼探测器准直过程中,准直光来自激光器2,激光器1耦合的光纤无需有光输出,准直过程如下:放置全反射镜、分光棱镜,先后使之与激光器2出射的光束垂直;遮盖全反射镜,激光器2发出的准直光经分光棱镜入射至哈特曼探测器探测面上并反射,观测该反射光并调节哈特曼探测器,使入射光在传感器中心,且反射光通过分光棱镜沿入射光路返回,保证光束垂直入射至哈特曼探测器;打开全反射镜,遮盖哈特曼探测器,调

节光纤输出端位置,使全反射反射的准直光通过分光棱镜入射至光纤端面。整个准直步骤完成后,即可保证点光源输出的球面波法线垂直于哈特曼探测器探测面中心位置。

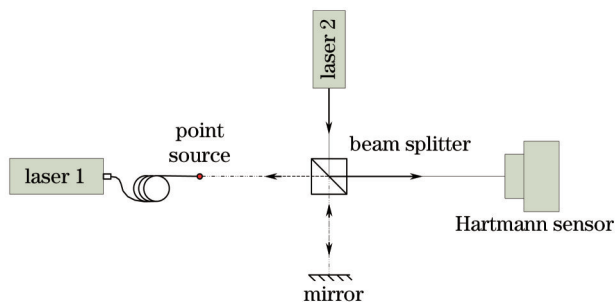


图4 辅助的光路准直装置

Fig.4 Experimental setup for aligning Hartmann sensor to the incident wave

确定了待测球面波的曲率半径,将哈特曼探测器放置在距点光源相应位置处,并经上述方法准直。实验中用已校准的哈特曼探测器分别测量了曲率半径为910、1078、1470 mm的球面波,模式法重构的波前图见图5。

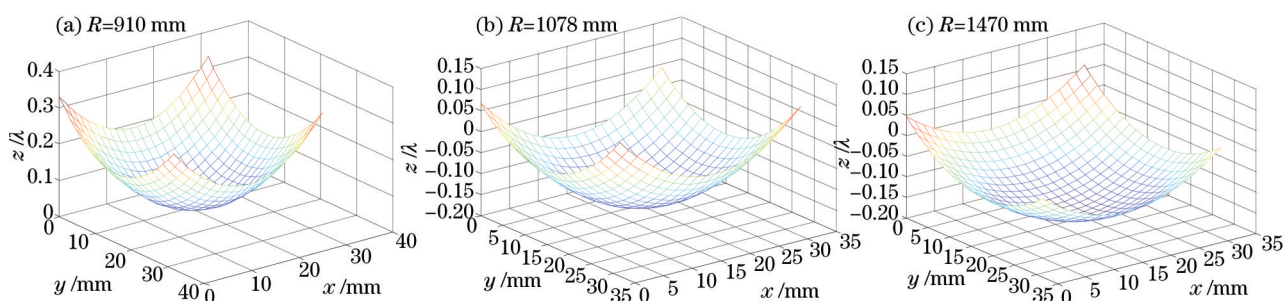


图5 已校准的哈特曼波前分析仪测量的球面波前

Fig.5 Spherical wavefronts measured by the corrected Hartmann wavefront analyzer

哈特曼波前分析仪测得的球面波波前与软件模拟的相同曲率半径的球面波前比较,计算出波前像差,波前像差计算公式^[1]为

$$w_{AF}(x, y) = w_c(x, y) - s(x, y), \quad (8)$$

式中 $w_c(x, y)$ 是哈特曼波前分析仪测得的经过斜率校正的波前, $s(x, y)$ 是软件模拟的相同曲率半径的球面波前。曲率半径分别为910、1078、1470 mm的球面波的波前像差图见图6。

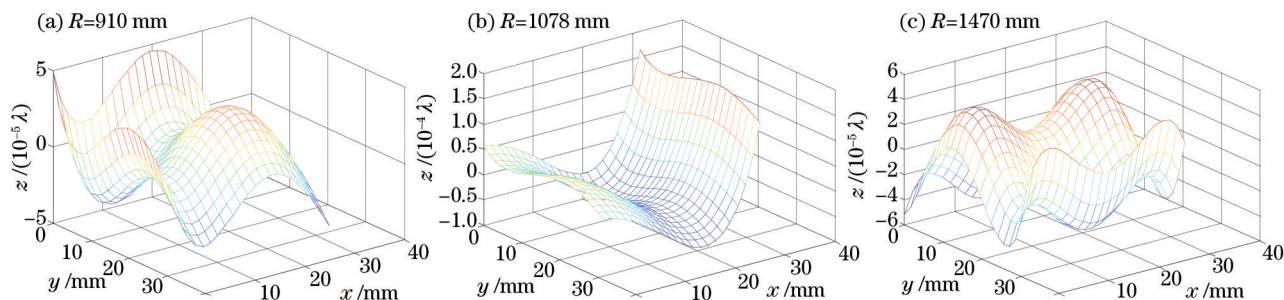


图6 波前像差3D图

Fig.6 3D representation of wavefront aberration

哈特曼波前分析仪主要误差来源包括:像点质心偏移量计算引入的误差,波前重构算法引入的误差,针孔面与 CCD 间距 L_H 值和针孔间距 d 值引入的误差。在上述实验中由于 L_H 参数已校准,被测波前的倾斜率也通过准直装置和算法进行了校正,所以哈特曼波前分析仪所测的波前像差主要来自与参考波前和被测波前质心的定位误差,以及波前重构算法引入的误差。

依据波前像差结果,进一步计算出波前像差 PV 值 w_{PV} 和波前测量精度 $w_{a,rms}$,波前测量精度依据

ISO15367-2^[11]定义计算。计算结果汇总至表3中。

表3 波前像差PV值和波前测量精度

Table 3 Wavefront aberration PV and wavefront accuracy

Spherical wave curvature radius /mm	$w_{a,rms} / \lambda$	w_{pv} / λ
901	1/35	1/7
1078	1/12	1/3
1470	1/25	1/6

从表3的数据可看出,运用第3节校准方法校准过的哈特曼波前分析仪测量球面波,波前测量精度可以达到 $\lambda/35$,波前像差PV值达 $\lambda/7$ 。这个实验数据充分表明了该哈特曼校准方法的有效性和校准结果的准确性。

5 结 论

哈特曼波前分析仪波前测量的主要误差来源有三方面:像点质心的精确定位,微孔阵列面与CCD面的间距 L_H 值,波前重构算法。其中像点质心的精确定位和波前重构算法引入的误差,取决于硬件的加工精度、尺寸,软件的背景噪声处理、算法选择和优化等因素,这些误差量只能通过硬件参数的合理选择和软件算法的改善来减小,是无法通过校准实现修正的。而微孔阵列面与CCD面的间距 L_H 值是可以利用校准手段获得准确修正的一个量值。该量值直接参与波前斜率计算,其准确性对波前斜率值,进而对重构的波前值有很大的影响。因此,哈特曼波前分析仪校准方法的研究是针对 L_H 参数的校准而言的。

由于哈特曼探测器结构的特殊性, L_H 参数只能是微孔阵列和CCD探测安装前的一个估计值,安装后是无法通过常规的长度测量手段校准的。不同于光学计量中常见的比较法,就像英国国家物理实验室NPL提出的将被校哈特曼波前分析仪溯源至更高一级的剪切干涉仪上^[13], L_H 参数的校准方法是一种自校方法,并不依赖于更高一级的波前测量仪器,而是将 L_H 参数的量值溯源到可以精确测量的长度量上。而且,校准装置中没有昂贵复杂的设备,校准过程操作便捷。因此该校准方法的应用不仅适合于专门的校准机构,同样适合于哈特曼波前分析仪的研发机构和使用机构。

参 考 文 献

- 1 ISO 15367. Lasers and Laser-Related Equipment-Test Methods for Determination of the Shape of a Laser Beam Wavefront-Part1: Terminology and Fundamental Aspects[S]. 2003.
- 2 Zhang Li, Tao Yanhui, Wang Guibing, *et al.*. Influence of airflow heating on aero-optic effects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 297-300.
张 黎,陶彦辉,王贵兵,等.气流加热对气动光学效应的影响[J].强激光与粒子束,2013,25(2):297-300.
- 3 Jiang Wenhan, Yang Zeping, Guan Chunlin, *et al.*. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1625-1634.
姜文汉,杨泽平,官春林,等.自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J].中国激光,2009,36(7):1625-1634.
- 4 Xu Liujing, Yang Ping, Liang Xingbo, *et al.*. Application of Hartmann-Shack wave front detector in testing distorted wave front of conduction cooled end-pumped slab[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802006.
徐鉴婧,杨 平,梁兴波,等.哈特曼夏克波前探测器对传导冷却端面抽运板条激光放大器的波前畸变测试[J].中国激光,2011,38(8):0802006.
- 5 Liu Minshi, Wang Xiaoman, Jing Wenbo, *et al.*. Design of parameters of Shack-Hartmann wave-front sensor for laser-beam quality measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0328002.
刘敏时,王晓曼,景文博,等.用于激光光束检测的夏克哈特曼传感器参量设计[J].光学学报,2013,33(3):0328002.
- 6 Li Jing, Gong Yan, Hu Xinrong, *et al.*. A high-precision centroid detecting method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316002.
李 晶,巩 岩,呼新荣,等.哈特曼夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J].中国激光,2014,41(3):0316002.
- 7 Zhang Hao, Hu Shaoyun, Zhong Ming, *et al.*. Comparison of two experimental measurement methods for M2 factor[J]. High Power

- Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2629–2633.
- 张 浩, 胡绍云, 钟 鸣, 等. 两种 M2 因子实验测量方法的比较[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2629–2633.
- 8 Pedro M P, Fernando V M, Stefan Goelz, *et al.*. Analysis of the performance of the Hartmann–Shack sensor in the human eye[J]. J Opt Soc Am A, 2000, 17(8): 1388–1398.
- 9 Bao Hua, Rao Changhui, Zhang Yudong, *et al.*. An automatic defocus compensation method for human eye Hartmann–Shack wavefront aberrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3082–3089.
- 鲍 华, 饶长辉, 张雨东, 等. 一种可用于人眼像差哈特曼夏克测量仪的自动离焦补偿方法[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3082–3089.
- 10 Li Chuncai, Gong Yan, Li Jing, *et al.*. Optical design of an inducible human eye accommodation fundus camera[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0422001.
- 李春才, 巩 岩, 李 晶, 等. 可诱导人眼自动调焦的眼底相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0422001.
- 11 ISO 15367–2. Lasers and Laser–Related Equipment–Test Methods for Determination of the Shape of a Laser Beam Wavefront–Part2: Shack–Hartmann Sensors[S]. 2005.
- 12 Wang Yanping, Ma Chong, Wang Qianqian. Hartmann wavefront sensor calibration system and method: China, CN 103267489[P]. [2013–08–28].
- 王艳萍, 马 冲, 王茜茜. 哈特曼波前传感器校准系统及校准方法: 中国, CN 103267489[P]. [2013–08–28].
- 13 Knox S D, Hall S R G, Stevens RF. Traceable measurements with wavefront sensors[C]. SPIE, 2005, 5965: 596516.

栏目编辑: 何卓铭