

# 用于激光光束检测的夏克-哈特曼传感器参量设计

刘敏时<sup>1</sup> 王晓曼<sup>1</sup> 景文博<sup>1</sup> 王 斌<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022  
<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要** 夏克-哈特曼波前传感器因其可以同时测量激光的强度及相位信息,已广泛用于激光光束质量检测中。根据实际检测的要求,设计夏克-哈特曼传感器系统的参数是构建检测系统的重要一环。综合考虑了夏克-哈特曼传感器的动态范围、灵敏度和精度等要求及其相互制约问题,进行了夏克-哈特曼传感器的参数设计。说明了具体的指标设计过程,并根据设计指标,研制了激光光束检测系统。系统实际达到的单孔径的动态范围为  $3.7\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),灵敏度为  $0.01\lambda$ ,菲涅耳数为 2.468,符合激光光束检测系统的要求。

**关键词** 传感器;夏克-哈特曼波前传感器;激光光束质量;微透镜阵列设计

**中图分类号** O348.11      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/AOS201333.0328002

## Design of Parameters of Shack-Hartmann Wave-Front Sensor for Laser-Beam Quality Measurement

Liu Minshi<sup>1</sup> Wang Xiaoman<sup>1</sup> Jing Wenbo<sup>1</sup> Wang Bin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*  
<sup>2</sup> *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China*)

**Abstract** Shack-Hartmann wave-front sensor has been widely used in laser-beam quality measurement, for its acquisition of intensity and phase of laser beam simultaneously. It is an important procedure in the construction of the measurement system to design the system parameters of the Shack-Hartmann wave-front sensor according to the requirements in actual laser beam test. The parameters of the Shack-Hartmann wave-front sensor are designed with considerations of the requirements of the precision, sensitivity and dynamic range, as well as the mutual restraints among them. The design procedure is given and the laser-beam measurement system is constructed successfully with the designed parameters. The actual Shack-Hartmann wave-front sensor in single aperture with dynamic range of  $3.7\lambda$  ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ ), sensitivity of  $0.01\lambda$ , and Fresnel number of 2.468, satisfies the requirements of the laser-beam measurements in practice.

**Key words** sensor; Shack-Hartmann wave-front sensor; quality of laser beam; design of lenslet array

**OCIS codes** 140.3295; 250.0040; 120.5050; 130.6010

## 1 引 言

夏克-哈特曼(S-H)波前传感器广泛用于自适应光学系统、光学元件镜面的表面面形检测、光学系统的像差检测、人眼像差检测和光通信等领域<sup>[1~3]</sup>。S-H波前传感器还有一个重要应用领域,即激光光

束的质量检测。由于可以同时测量激光光束的强度信息及相位信息,S-H波前传感器可提供激光光束和光学系统详细的动态信息,因而已被广泛应用于激光光束质量的动态、静态检测和诊断。

基于S-H波前传感器的激光光束质量测量系

**收稿日期**: 2012-11-13; **收到修改稿日期**: 2012-11-26

**作者简介**: 刘敏时(1987—),女,博士研究生,主要从事激光光束质量、波前探测和图像处理等方面的研究。

E-mail: liums49@sina.com

**导师简介**: 王晓曼(1956—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信、光电信息处理和激光光束质量等方面的研究。

E-mail: wmflys@126.com(通信联系人)

统的工作原理是:通过微透镜阵列将激光光束分割成若干子光斑,成像于图像传感器上,通过数据采集分析系统,获得光斑图像。通过计算光斑质心,得到平均波前斜率信息;通过算法拟合,得到激光光束的波前<sup>[4]</sup>;利用激光光束的强度及相位信息,计算激光光束的束腰直径,束散角及激光光束质量因子  $M^2$  值等。

在激光光束质量检测的应用中,重点关注的是 S-H 波前传感器的动态范围<sup>[5]</sup>、灵敏度、待测激光光束的束宽等指标。通常情况下,S-H 波前传感器的单孔径动态范围在  $1\lambda \sim 5\lambda$ ,  $\lambda$  为波长,灵敏度为  $\lambda/10 \sim \lambda/500$ 。Thorlabs 公司设计研发的两款具有代表性的波前传感器(WFS150 和 WFS300)的灵敏度分别为  $\lambda/50$  和  $\lambda/150$ ,其对应的全孔径的动态范围为  $100\lambda$  和  $50\lambda$ <sup>[6]</sup>。德国激光研究院研制的用于激光光束质量检测的波前传感器的灵敏度为  $\lambda/500$ ,对应的全孔径的动态范围为  $100\lambda$ <sup>[7]</sup>,处于国际领先地位。我国研制夏克-哈特曼波前传感器的主要单位为中国科学院光电技术研究所,该单位依托于微细加工国家实验室,具有制作微透镜阵列的能力<sup>[8]</sup>。

S-H 激光光束质量检测系统除了要满足上述的动态范围、灵敏度等指标要求外,还需要解决相应器件和系统装调的问题,包括满足要求的微透镜阵列和电荷耦合器件(CCD)探测器的选择等。所以,合理的设计 S-H 波前传感器的参数,是激光光束检测系统研制的首要任务<sup>[9]</sup>。基于此,本文对 S-H 波前传感器的参数设计进行了探讨,得到了最优指标,并据此成功研制出满足检测系统要求的 S-H 波前传感器。

## 2 夏克-哈特曼波前传感器主要参数

S-H 波前传感器在设计中的选择指标主要包括微透镜阵列的动态范围、灵敏度、精度和光照强度等。其中需要考虑的参数包括微透镜子孔径的宽度、微透镜的焦距以及微透镜阵列的单元个数。微透镜阵列的动态范围和灵敏度是相互制约的指标参数,合理地匹配前端数据,使得在最优化的动态范围内,达到最优的精度,以减小波前拟合误差和波前测量误差,使测试的激光光束质量因子  $M^2$  数据达到最佳值,是设计中的首要问题。

### 2.1 微透镜阵列的动态范围

动态范围指微透镜阵列对两个子光斑的区分程度<sup>[10]</sup>,即子透镜中成像的光斑,不能超出子透镜的成像区域。光斑在水平方向上的最大位移可以表示为

$$\Delta x_{\max} = \frac{1}{2}(d_x - d_p), \quad (1)$$

式中  $d_x$  为子透镜在  $x$  方向上的宽, $d_p$  为子透镜成像的艾里斑直径(在 S-H 波前传感器系统中,子透镜的相对孔径很小,所以此处可以通过艾里斑直径表示通过微透镜阵列所形成的子光斑的直径):

$$d_p = \frac{2\lambda f}{d_x}, \quad (2)$$

式中  $f$  为微透镜阵列的焦距。由此可得到  $x$  或  $y$  方向上的角动态范围

$$\tan \theta = \frac{d}{2f} - \frac{\lambda}{d}, \quad (3)$$

式中  $d$  为微透镜阵列在  $x$  或  $y$  方向上子透镜的宽度。在传感器的制作中,要求图像探测器的成像面尽可能在微透镜的焦距处。转换为常用的以  $\lambda$  为单位衡量的波像差形式为

$$W_\theta = \left( \frac{d}{2f} - \frac{\lambda}{d} \right) \cdot \frac{d}{\lambda}. \quad (4)$$

动态范围在任何情况下,都正比于子透镜的宽度,反比于微透镜的焦距。

### 2.2 微透镜阵列的灵敏度

微透镜阵列的灵敏度表示可以测量到的波阵面面形的最小变化<sup>[11]</sup>,用探测器的像元尺寸和微透镜有效焦距的比值来表示。光斑的位移量受到光斑在图像上质心移动的像素数的制约,进而和图像的质心算法<sup>[12]</sup>的精度密切相关。因此,微透镜阵列的灵敏度为

$$\tan \varphi = \frac{hP}{f}, \quad (5)$$

式中  $P$  为传感器的像元尺寸, $h$  为一个常量,表示计算光斑质心的算法精度。转换为常用的以  $\lambda$  为单位衡量的波像差形式为

$$W_\varphi = \left( \frac{hP}{f} \right) \cdot \frac{d}{\lambda}, \quad (6)$$

通常情况下,质心算法的精度可以达到  $1/20$  或  $1/50$ ,比较好的质心算法精度可达  $1/100$ 。

### 2.3 微透镜阵列的精度

微透镜阵列的精度受到多个参数的影响,当只考虑 S-H 波前传感器固有误差时,精度的受到的影响主要来自两个方面:1)微透镜在 CCD 上的理想成像位置 and 实际产生的光斑位置是否匹配。因此需要使光斑的质心和微透镜的光轴充分对准以减小可能产生的彗差。另外,只有光斑覆盖足够多的像素时,才能提高质心的探测精度,要求光斑覆盖的最小像素范围为  $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 。2)微透镜数量的选

择。微透镜是对波前进行采样,微透镜的数量足够多时,可以对波前进行更精准的采样,从而可以更精准地重构波前。但是这会使得每个子透镜的宽度减小,损失微透镜的动态范围。因此,微透镜的数量应有一个最佳值,可以兼顾精度及动态范围两者。

## 2.4 光照强度

光照强度表示的是光能量的一个预算值。影响它的两个主要因素是子透镜的宽度和微透镜的焦距。子透镜的宽度直接影响每一个子光斑的能量,而微透镜的焦距控制成像光斑的大小。当传感器的像元尺寸确定后,每个像素上的能量值就确定了,即将整个光斑的能量分配给所覆盖的像素,从而得到单个像素上的能量值。

## 3 夏克-哈特曼激光光束检测

合理选择 S-H 波前传感器的子透镜的宽度、微透镜的焦距、像元尺寸以及微透镜阵列的个数等参数,使传感器的各项指标达到一个最佳匹配。需要考虑的因素主要包括:动态范围和灵敏度的匹配、动态范围和重构精度的匹配以及微透镜焦距的选择。

### 3.1 动态范围和灵敏度的匹配

动态范围和灵敏度指标分别反映了最大可测量的波前面积和最小可测量的波前面积<sup>[13]</sup>,都与微透镜的有效焦距相关:

$$\frac{d}{2(\theta + \lambda/d)} = \frac{hP}{\varphi}, \quad (7)$$

将已知要测量的面形的最大值和最小值,代入(7)式,即可初步计算得到微透镜阵列的宽度和像元尺寸。

### 3.2 动态范围和重构精度的匹配

微透镜阵列另一个需要考虑的参数是微透镜的个数。微透镜个数多,探测精度高,即提高了波前重构精度;微透镜过于密集,相应的子透镜的宽度小,测量动态范围下降。因此需要根据动态范围和精度的实际需求,确定微透镜的个数。

另外,还要参考选定像元尺寸,通过合适的传感器的像面尺寸,最终确定比较合理的微透镜个数。

### 3.3 微透镜阵列焦距的选择

当子透镜的宽度和像元尺寸经确定后,合理地选择微透镜的焦距,用来同时满足测量动态范围和灵敏度的指标。大的动态范围需要短焦距,而高的灵敏度需要长焦距。因此焦距的选择范围为

$$\frac{hP}{\varphi} < f < \frac{d}{2(\theta + \lambda/d)}, \quad (8)$$

在这个焦距范围内,还需要考虑系统装调的问题。较短的焦距,不但容易产生像差,而且使得微透镜的装调变得复杂,此时小的偏差,都会产生大的面形计算误差。

基于上述考虑和实际的指标需求,完成对 S-H 波前传感器参数设计。

## 4 仿真设计结果

根据实际需要,设计完成激光光束质量测试设备。其单孔径动态范围达到  $3.6\lambda$ ,灵敏度要求达到  $0.02\lambda$ ,可测试波长范围为  $400 \sim 1100 \text{ nm}$ ,基准波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,质心探测精度为一般算法可以达到的  $1/20$ 。

需要考虑的是子透镜的宽度和相机的选择,先选择像元尺寸。通过仿真可以得到微透镜子透镜的宽度相对于相机像元尺寸的关系曲线,如图 1 所示。其中,仿真选择动态范围为  $4\lambda$ ;仿真选择为  $0.02\lambda$ ;仿真初始选择质心算法的精度为  $1/20$ 。

根据图 1,可以得到表 1 的数值结果。

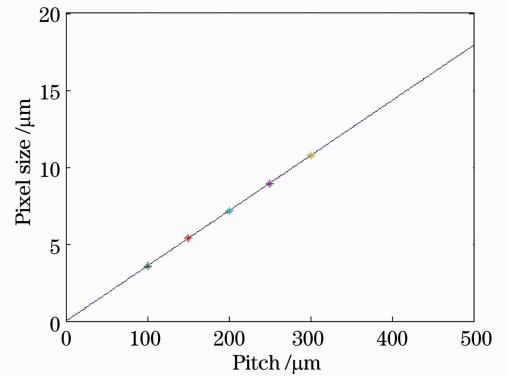


图 1 微透镜阵列子透镜宽度和像元尺寸之间的关系曲线

Fig. 1 Relation between pitch of daughter lenslet of lenslet array and pixel size

表 1 微透镜子透镜的宽度和像元尺寸之间的几组典型数据

Table 1 Typical data of relation between pitch of daughter lenslet of lenslet array and pixel size

No.	Pitch / $\mu\text{m}$	Pixel size / $\mu\text{m}$
1	100	3.5844
2	150	5.3766
3	200	7.1687
4	250	8.9609
5	300	10.7531

根据实际情况,选择微透镜阵列子透镜的宽度为  $150 \mu\text{m}$ ,选择相机的像元尺寸为  $6.45 \mu\text{m}$ ,综合

考虑全孔径动态范围及相机的种类,选择像面尺寸为  $9.0\text{ mm} \times 6.7\text{ mm}$ ,选择微透镜阵列的个数为  $50 \times 40$ 。

微透镜焦距的设计,根据(8)式和系统要求达到的动态范围和灵敏度数值,进一步求取相对的焦距范围。根据上面的选择,进一步调整质心探测精度为  $1/50$ (质心探测精度的提高依赖于算法,一般较好的质心探测精度可以达到  $1/50$  或者  $1/100$ ,更好的算法精度更高),得到的焦距范围为  $1.53 \sim 3.56\text{ mm}$ ,可以根据实际情况,在此范围内选择合适的焦距。本系统选择焦距为  $3.6\text{ mm}$ 。因此,设计的系统可达到的单孔径动态范围为  $3.9\lambda$ ,灵敏度为  $0.0085\lambda$ 。

## 5 实际系统的测试结果

根据上面的设计,成功研制 S-H 波前传感器的探头和针对激光光束检测的 S-H 波前传感器系统。系统的测试精度源于系统装调误差、质心探测误差、波前重构误差以及外部环境影响等。在 S-H 波前传感器研发完成后,用平行光管发出的标准光源进行标定,可除去系统误差。此 S-H 波前传感器系统可成功地应用到激光光束检测中。

图 2 为 S-H 波前传感器的探头,其设计过程如 4 节所述。最终的 S-H 波前传感器参数为:微透镜阵列子透镜的宽度为  $150\text{ }\mu\text{m}$ ,焦距为  $3.6\text{ mm}$ ,相机的像元尺寸为  $9.0\text{ mm} \times 6.7\text{ mm}$ ,微透镜阵列的个数为  $50 \times 40$ ,质心探测精度为  $1/50$ ,系统的帧速率为  $6\text{ Hz}$ ,系统的探测均方根误差为  $\lambda/20$ 。



图 2 研制的 S-H 波前传感器探头

Fig. 2 Manufactured probe of the developed Shack-Hartmann wave-front sensor

对激光光束检测仪进行了实际性能测试。在动态范围的测试中,用平行光管产生平行光,使之入射到激光光束检测仪的入射窗口。旋转 S-H 波前传感器,使每一个子孔径在  $y$  方向达到极限程度,检测系统可测试到的波前最大倾斜量为  $3.7\lambda$ ,对应于全孔径的最大倾斜量为  $148\lambda$ ,达到设计指标。在灵

敏度的测试中,在精密导轨上放置平行光管及望远系统,标准平行光通过望远系统入射到激光光束检测仪的入射窗口,精密调节望远系统的目镜,改变波面的离焦量,仪器可以探测到的最小波面变化为  $0.01\lambda$ ,达到设计指标要求。

图 3 为对某氦氖激光器的实际检测系统。图 4 为实际得到的激光光束的波前信息及特征值信息。图中,左侧窗口为实际得到的激光光束的光斑图像,右侧上部窗口为实际测试中得到的激光光束波前的三维图。

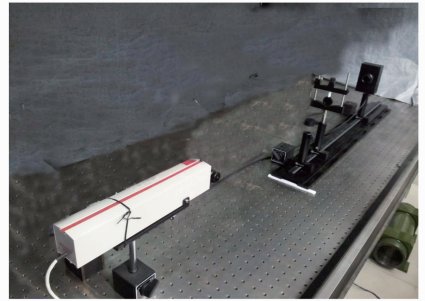


图 3 对某氦氖激光器的实际检测系统

Fig. 3 Detection system of Shack-Hartmann wave-front sensor for He-Ne laser

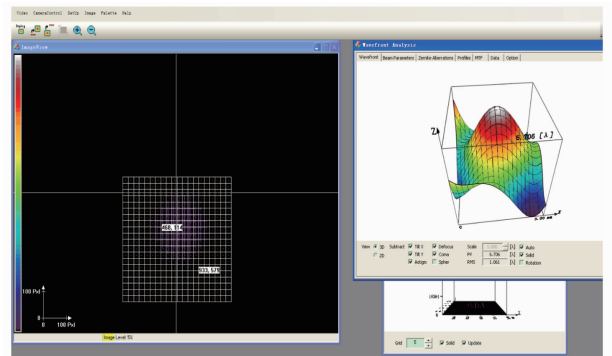


图 4 软件界面图

Fig. 4 Software interface diagram

通过菲涅耳数和艾里斑的直径所占像素数,进一步判定此 S-H 波前传感器系统的性能。Du 等<sup>[14]</sup>指出,当菲涅耳数介于  $2 \sim 5$  之间时,S-H 波前传感器具备较高的灵敏度并且焦斑间的串扰可以忽略。菲涅耳数的计算公式为

$$F_N = \frac{(d_x/2)^2}{\lambda f}. \quad (9)$$

通过设计,系统的菲涅耳数为  $2.468$ ,达到系统要求。系统的艾里斑所占的直径为  $60.75\text{ }\mu\text{m}$ ,直径所占像素数为  $10\text{ pixel} \times 10\text{ pixel}$ ,完全可以达到系统要求和质心计算的精度要求。

## 6 结 论

综合考虑了激光光束检测中的实际指标要求,对 S-H 波前传感器的设计参数提出系统的选择和优化方法,这对实际的激光光束质量检测系统的设计和研制提供了一定的指导意义。根据提出的参数设计方法所研制的激光光束检测系统,已成功地应用到实际激光质量检测中,仪器的动态范围和灵敏度的指标达到国际水平,实测的参数指标与设计的参数指标相符。

### 参 考 文 献

- Mu Guoguang, Wang Zhaoqi, Liu Yongji *et al.*. Optical study on the vision correction and supernormal vision based on the wavefront aberrations of human eye[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2007, **50**(3): 257~267  
母国光, 王肇圻, 刘永基等. 基于眼波前像差的视觉矫正及超视觉的光学研究[J]. *中国科学: 科学技术*, 2007, **50**(3): 257~267
- Wu Jing, Wang Jianli, Lin Xudong *et al.*. Wave-front test by sub-aperture stitching technique based on Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(1): 39~43  
吴晶, 王建立, 林旭东等. 基于 Shack-Hartmann 的子孔径拼接波前检验技术[J]. *光电工程*, 2011, **38**(1): 39~43
- Wang Yang, Wang Zhaoqi, Guo Huanqing *et al.*. Impact of higher-order wavefront aberrations of human eyes on vision performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1519~1525  
王杨, 王肇圻, 郭欢庆等. 人眼的高阶像差对视功能的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1519~1525
- 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  
徐臻婧, 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
- Zhang Jinping, Zhang Zhongyu, Zhang Xuejun *et al.*. Algorithm for extending dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812006  
张金平, 张忠玉, 张学军等. 增大夏克-哈特曼波前传感器动态范围的算法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812006
- Optical wavefront sensors (Shack-Hartmann sensors) WFS series operation manual [EB/OL]. [2012-05-27]. <http://www.thorlabs.com/Thorcat/19900/WFS150-5C-Manual.pdf>
- Hartmann-Shack wavefront analyzer [EB/OL]. [http://www.llg-ev.de/fileadmin/user\\_upload/Abt\\_KWI/produkte/Dienstleistungen/PDF/Flyer\\_Wavefrontsensor\\_070821.pdf](http://www.llg-ev.de/fileadmin/user_upload/Abt_KWI/produkte/Dienstleistungen/PDF/Flyer_Wavefrontsensor_070821.pdf)
- Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui *et al.*. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, Chinese academy of sciences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900106  
姜文汉, 张雨东, 饶长辉等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900106
- B. Schfer, M. Lübbecke, K. Mann. Propagation analysis of laser beams from Hartmann-Shack measurements [C]. *SPIE*, 2006, **6343**: 634348
- D. R. Neal, D. M. Topa, J. Copland. The effect of lenslet resolution on the accuracy of ocular wave-front measurements [C]. *SPIE*, 2001, **4245**: 78~91
- D. R. Neal, J. Copland, D. Neal. Shack-Hartmann wave-front sensor precision and accuracy [C]. *SPIE*, 2002, **4779**: 148~16
- Feng Xinxing, Zhang Liyan, Ye Nan *et al.*. Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512002  
冯新星, 张丽艳, 叶南等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0512002
- Cheng Shaoyuan, Cao Zhaoliang, Hu Lifa *et al.*. Measurement of wavefront aberrations of human eyes with Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(5): 1060~1067  
程少园, 曹召良, 胡立发等. 用夏克-哈特曼探测器测量人眼像差[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(5): 1060~1067
- C. Du, K. Zürl, J. Schwider. Wavefront characterization with a miniaturized Shack-Hartmann sensor [J]. *Optik*, 1996, **101**(4): 151~156

栏目编辑: 张 腾