

文章编号: 1002-1582(2011)03-0362-04

多用途、模块化哈特曼波前传感器的研制^{*}

李宏壮, 刘欣悦, 王志臣, 王建立
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 分析了哈特曼传感器的主要设计指标, 介绍了设计研制的一种多用途、模块化哈特曼传感器, 通过将传感器的主要部件, 包括光源、准直镜、分光棱镜、缩束光路、微透镜阵列及相机等进行模块化设计, 根据不同需求, 对各模块增减或更换, 实现了一套传感器多种用途的应用。并用该传感器进行了系统波像差及光学元件面形检测实验, 通过与 Zygo 干涉仪的测量结果对比, 得出该传感器测量精度 ≤ 50 RMS。
关 键 词: 哈特曼波前传感器; 模块化设计; 波像差检测; 面形检测
中图分类号: TH 751 文献标识码: A

Develop of multi-application and modular Hartmann wavefront sensor

LI Hongzhuang, LIU Xinyue, WANG Zhichen, WANG Jianli
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The primary performance parameters of Shack-Hartmann sensor are analyzed. A kind of modular and multi-application Hartmann sensor is introduced. The primary components of the sensor, including light source, collimate lens, beam splitter, beam reducer, microlens array, camera and etc are modular designed. Through adding, reducing, or replacing each module according to different requirement, the sensor can be used in multi-field. The experiment of wavefront error test and surface error test are implemented using the Hartmann sensor, and the results are compared with Zygo interferometer. The experiment results show that the accuracy of the Hartmann sensor is better than ≤ 50 RMS.
Key words: Shack-Hartmann wavefront sensor; modular design; wavefront error test; surface error test

0 引 言

哈特曼(Shack-Hartmann, S-H)波前探测技术可以通过测量波前斜率, 即一阶导数, 来获得波前的相位信息。由于不需要参考波面, 可直接利用星光等目标光源进行检测, 因此在主动光学、自适应光学、大口径望远镜检测及眼科诊断等领域得到了广泛地应用。另外, 由于与干涉仪相比, 哈特曼传感器

具有实时测量、不受环境(尤其是震动)影响、结构紧凑、价格低廉等优点, 在光学元件和光学系统检测中也具有特色。
目前在发达国家, 如美国、法国、荷兰、意大利、俄罗斯等都已经开发出哈特曼产品, 可以根据用户的不同需求, 选择合适的性能指标进行定制产品。但进口产品的价格昂贵, 而且每一款产品仅能满足一种应用需求。

^{*} 收稿日期: 2011-01-11; 收到修改稿日期: 2011-03-16 E-mail: jilinbayan@163.com
作者简介: 李宏壮(1980), 男, 长春光学精密机械与物理研究所副研究员, 博士, 从事光学设计、检验、大口径望远镜波前检测、主动光学研究。

本文首先分析了哈特曼传感器在设计时应考虑的指标, 然后介绍了我们设计研制的一套多用途、模块化哈特曼传感器。该传感器将主要的硬件进行模块化设计, 通过更换硬件模块, 可以方便地实现不同领域、精度、采样率的应用要求。

1 哈特曼传感器的设计指标

哈特曼传感器的主要指标有动态范围、灵敏度、测量精度、探测速度及探测能力等, 随着不同的应用, 对这些指标的要求也有很大差别。在天文望远镜检验、主动光学应用中, 采用星光作为光源, 要求传感器具有很高的探测能力, 对灵敏度和精度也有一定的要求, 但一般动态范围要求不高; 在自适应光学中, 除了与上述望远镜检验有相同的要求外, 最重要的要求是探测速度, 通常测量大气湍流的 S-H 传感器要达到 kHz, 而且由于速度要求高, 积分时间短, 对探测能力的要求更高; 在光学元件检验中, 则要求有较高的精度和足够的采样率, 并有一定的动态范围; 下面对各项特性指标分别进行分析^[1-4]。

(1) 动态范围

动态范围描述了可测的局部最大波前倾斜量, 一般以最大测量倾斜和最小测量曲率两种形式表示, 以倾斜角度表示为

$$m_{\max} = \frac{h \cdot D}{f}$$

(1)

式中 D 为微透镜子孔径直径; f 为微透镜焦距; 一般 $h = 0.5$, 当采用光斑质心追踪算法等扩大传感器动态范围时, h 可取更大的值。可见, 动态范围与微透镜子孔径尺寸成正比, 与焦距成反比。

(2) 灵敏度

灵敏度表示最小可测量波前斜率, 受光斑质心位移的计算精度限制。光斑质心位移量通常用 CCD 的像素尺寸描述, 设光斑定位精度为 q 个像素, 像元尺寸为 P , 靶面上的最小分辨距离为 qP , 则最小可探测倾斜, 即灵敏度为

$$m_{\min} = \frac{q \cdot P}{f}$$

(2)

采用特殊算法, 如亚像素法等, 可使 $q < 1$ 。可见光斑质心探测精度越高, 焦距越长, 传感器的灵敏程度越高。传感器的灵敏度与其重复测量精度是一致的, 因此可通过测量重复性得到其敏感度^[5]。

(3) 测量精度

测量精度即波前复原精度, 一方面与光斑质心定位精度有关, 这要求微透镜不能有慧差等使所成像斑不对称的像差, 同时每个像斑占的像元数要足

够多, 一般要求大于 $4 \sim 4$ 个像元。另一方面, 子孔径数越多, 可以拟合波面像差多项式的阶数越多, 波面复原精度越高。但在相同子孔径数时, 拟合多项式的阶数过多, 又会使模式耦合误差和测量噪声增加, 反而降低精度。而且光瞳内子孔径数过多, 使每个子孔径内的能量降低, 影响传感器的探测能力, 同时计算量增加, 响应速度下降。

(4) 探测速度

对探测速度的影响主要分为两个方面, 一是相机的影响: 量子效率高的相机, 测量中的曝光时间可以缩短。另外当单个像素读出速度一定时, 总的像素数越少, 整幅图像的读出速度越高; 二是计算量的影响: 像素数越多, 子孔径数越多, 计算量越大, 因此要在探测速度和测量精度之间做出折衷选择。

(5) 探测能力

在天文望远镜检验、主动光学及自适应光学应用中, 通常用星光作为光源, 因此对传感器探测能力的要求较高。为了图像的准确提取, 要保证每个含有目标的像元获得的信噪比大于或等于 6。当给定望远镜口径、焦距、哈特曼传感器的子孔径数、微透镜的焦距及相机参数时, 就可推算出能够作为光源进行测量的目标星等。

通过以上分析可见, 各指标之间相互影响, 设计传感器时, 应根据不同的应用领域中, 着重考虑其中的某一项或几项。

2 模块化哈特曼传感器的研制

2.1 硬件模块设计

由于不同应用领域对传感器的性能要求有很大差别, 因此将传感器的主要硬件模块化设计, 实现一套传感器多种用途的应用。模块间具有通用接口, 可以方便拆卸更换。包括光源模块、准直镜模块、分光棱镜模块、缩束光路模块、微透镜模块及相机模块。通过用标准波面设置参考, 可以将加工、调整等引起的系统误差去除, 降低对装调精度的要求。

通过增减、更换部分功能模块, 实现在不同领域应用的传感器, 如图 1。

图 1(a) 其中的传感器由微透镜模块和相机模块组成, 可以对口径内平行光进行波前测量; (b) 加入了准直镜模块。 (c) 其中的传感器加入了缩束光路模块, 将大尺寸的微透镜阵列像斑成像到小的 CCD 靶面上。 (d) 加入光源模块、分光棱镜模块、准直透透镜模块的哈特曼传感器, 可以对光学元件进行面形检测。同样可以在微透镜模块和相机模块之间增加缩束光路模块, 提高采样率。 (e) 使用高灵敏

相机组成的哈特曼传感器,用于望远镜波前差检测。

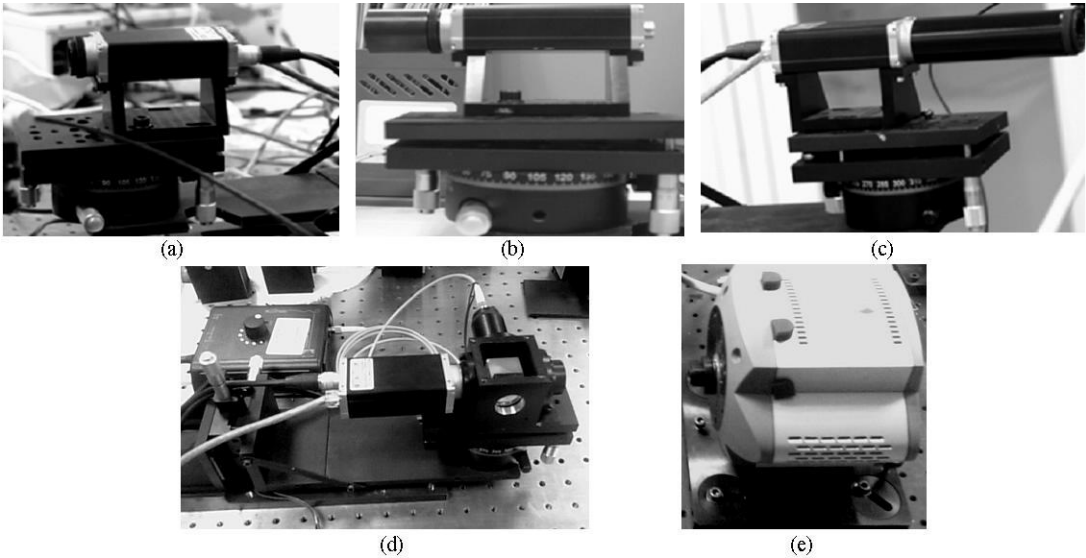


图 1 不同应用中的哈特曼传感器

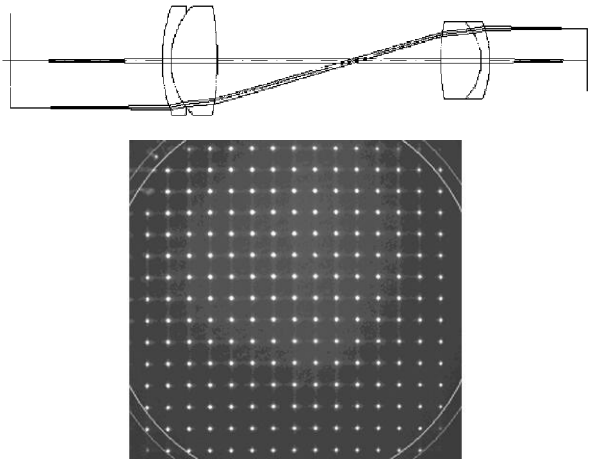


图 2 缩束光路及实际所成点像

缩束光路的设计如图 2 所示,采用双远心设计,使微透镜阵列及相机的光轴方向位置误差均不

影响光斑的质心分布,成像质量接近衍射极限,缩束光路放大倍率为 0.68。

2.2 应用与测试

为了测试哈特曼传感器的测量精度及验证多用途、模块化的可实现性,我们使用该传感器对系统波前误差及光学元件面形进行了检测,并与 Zygo 干涉仪的结果进行了对比,以 Zygo 为基准,得到哈特曼传感器的测量误差。

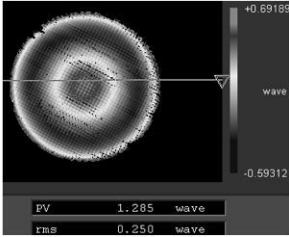
我们选用的传感器参数如表 1。

表 1 哈特曼波前传感器指标

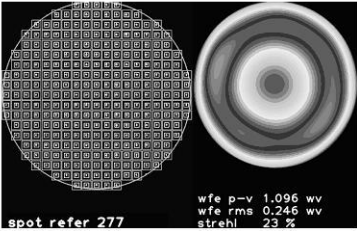
微透镜口径/ m	300	微透镜焦距/ mm	8.73
相机象元尺寸/ m	13 13	靶面/ mm	8.47 7.1
量子效率/ %	40		



(a) 用哈特曼对波像差测量



(b) Zygo 自准直检验结果



(c) 哈特曼测试结果

图 3 对系统波像差的测试结果

2.2.1 对系统波前的检测

模拟单块透镜对无穷远目标成像,测试系统波像差。

先用 Zygo 干涉仪进行自准直波像差检验,将结果与哈特曼的结果相对比。哈特曼采用图 1(b)的模块,准直透镜采用焦距为 50mm 的双胶合透

镜,测试有效点为 277 个。哈特曼测试前先用干涉仪发出的理想球面波做参考,以去除系统误差。

结果如图 3 所示,干涉仪测试结果为 PV = 1.285 (= 632.8nm), RMS = 0.25 ;哈特曼测试结果为 PV = 1.096 , RMS = 0.246 。

2.2.2 对光学元件面形的测试

采用图 2(d) 的模块, 分别对 4 个反射元件表面进行了检测, 如图 4 所示。为了与被测面的 F 数匹配, 更换不同焦距的准直透镜。测试前用标准球面反射镜做参考, 去除系统误差。测试结果见图 5 及表 2。

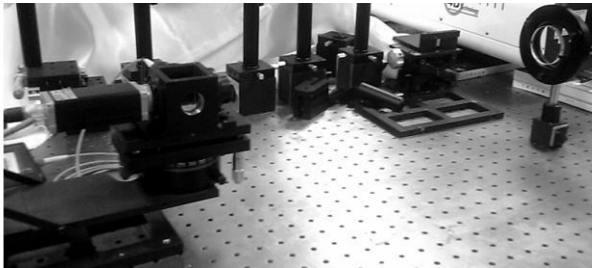


图 4 对光学元件面形的测试

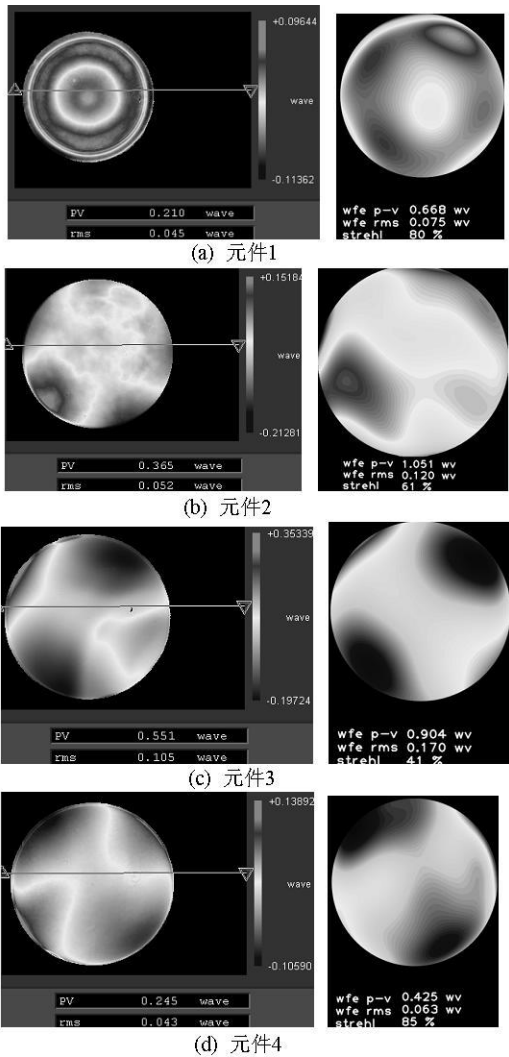


图 5 Zygo 和 Hartmann 分别对 4 个元件面形测试结果对照(轮廓图)

表 2 Zygo 和 Hartmann 对 4 个光学元件面形测试结果对照

测试元件		元件 1	元件 2	元件 3	元件 4
Zygo 结果	PV/	0. 21	0. 365	0. 551	0. 245
		0. 045	0. 052	0. 105	0. 043
Hartmann 结果	RMS/	0. 334	0. 525	0. 452	0. 212
		0. 0375	0. 06	0. 085	0. 031

通过检测实验可以得出, 测量精度: RMS 优于 $1/50$, PV 优于 $1/6$; 传感器的重复性精度, 即灵敏度为: RMS 优于 $1/200$, PV 优于 $1/30$ 。测量中硬件模块方便更换, 通过设置参考, 能够将系统误差去除。

3 结 论

本文首先分析了哈特曼传感器设计时应该考虑的主要性能指标。然后介绍了我们设计研制的一套模块化、多用途哈特曼传感器, 该传感器将主要硬件模块化设计, 各模块间具有通用的机械接口, 方便拆卸更换, 可用于光学元件面形检测、系统波像差检测、主动光学及望远镜检验等领域。

并使用该传感器进行了系统波像差及光学元件面形检测实验, 通过与 Zygo 干涉仪的结果对比, 得出传感器的测量精度优于 $1/50$ RMS。测量中通过对标准波面做参考, 将系统误差去除, 降低了装调的难度, 验证多用途、模块化的可实现性。下一步我们将在望远镜检测和主动光学中对该传感器的应用进行进一步的测试。

参考文献:

[1] Curatu C, Curatu G, Rolland J. Fundamental and specific steps in Shack-Hartmann wavefront sensor design [J]. SPIE, 2006, 6288: 1-8.

[2] Neal D R, Copland J, Neal D. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy[J]. SPIE, 2002, 4779: 148-160.

[3] Neal D R, Pulaski P, Raymond T D, et al. Testing highly aberrated large optics with a Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. SPIE, 2003, 5162: 1-10.

[4] Neal D R, Armstrong D J, Turner W T. Wavefront sensors for control and process monitoring in optics manufacture [J]. SPIE, 2004, 2993: 211-220.

[5] 李宏壮, 王建立, 林旭东, 等. 薄反射镜主动光学实验系统[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 120-126.

Li H Z, Wang J L, Lin X D, et al. Active optics experiment system with thin mirror [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6): 120-126.