

文章编号:1002-2082(2012)01-0134-05

Shack-Hartmann 波前传感器在光学检验中的应用

李宏壮,王志臣,刘欣悦,卫沛峰,明 名,孟浩然

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要:介绍用于光学检测的 Shack-Hartmann(S-H)波前传感器,以及相应的检测实验结果。在实验室内,通过与 Zygo 干涉仪的测量结果对比,得出传感器的测量精度优于 $\lambda/50$ RMS($\lambda=632.8$ nm)。在外场利用星光作为光源,对口径 1 m、焦距 11 m 的望远镜进行了系统波像差检验,测量结果为 $0.39\lambda\sim0.46\lambda$ RMS 之间,并随着俯仰角的增加而增大,主要像差形式为三阶像散。

关键词:Shack-Hartmann 波前传感器;面形检测;波像差检测;光学检验

中图分类号:TN206;TH751

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201233.0103007

Application of Shack-Hartmann wavefront sensor in optical testing

LI Hong-zhuang, WANG Zhi-chen, LIU Xin-yue, WEI Pei-feng, MING Ming, MENG Hao-ran

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS,

Changchun 130033, China)

Abstract: Shack-Hartmann (S-H) wavefront sensors were developed for optical test and the corresponding experiment results are introduced. In the laboratory, the test results were compared with Zygo interferometer, which showed that the accuracy of the S-H sensor was better than $\lambda/50$ RMS. And using star as light source, the wavefront error of the telescope with 1m diameter and 11m focal length was tested through the S-H sensor. The results show that the wavefront error of the telescope is about $0.39\lambda\sim0.46\lambda$ RMS, and the error inceases as the elevation angle of the telescope increases. The dominating wave-front error is 3rd astigmatism.

Key words: Shack-Hartmann wavefront sensor, surface error test, wavefront error test, optical test

引言

目前 Shack-Hartmann(S-H)波前传感器是主动光学和自适应光学系统中应用最广泛的波前测量设备,由于其不需要参考光束、受环境影响小、实时测量等特点,在光学检验中同样具有优势。

介绍我们分别针对光学元件面形和光学系统波像差检测开发的相应 S-H 传感器,以及在实验室内和外场环境下进行检测的实验结果。

1 S-H 传感器的光学元件面形检验

1.1 传感器设计

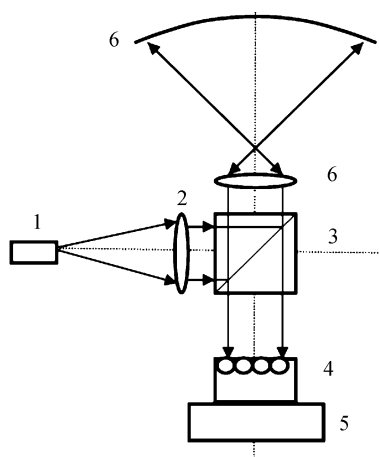
S-H 波前传感器的主要性能指标有动态范围、灵敏度、测量精度、探测速度及探测能力等,随着不同的应用,对这些指标的要求也不同^[1-2]。在光学元件检验中,要求传感器有较高的精度和足够的采样率,并有一定的动态范围,而对探测速度和探测能力要求不高。通过计算,我们选用了子孔径 $300\ \mu\text{m}$ 、焦距 8.73 mm 的微透镜阵列; CCD

收稿日期:2011-04-20; 修回日期:2011-06-01

作者简介:李宏壮(1980—),男,黑龙江巴彦人,博士,副研究员,主要从事光学设计、光学检测、大口径望远镜主动光学及波前探测技术。

相机采用 Basler piA2400, 像元尺寸为 $3.45\ \mu\text{m} \times 3.45\ \mu\text{m}$, 像元数为 2456×2058 , 可见光波段内平均量子效率可达 40%, 使用中为提高采样速度, 采用 4×4 合并像素。

传感器将主要硬件模块化设计, 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。模块间具有通用接口, 可以方便拆卸更换。通过用标准波面标定, 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。光路结构如图 1 所示, 传感器如图 2 所示。



1. 激光源; 2, 6. 准直镜; 3. 光束分离器;
4. 小透镜; 5. CCD; 6. 测试面;

图 1 用于元件面形检测的 S-H 模块结构

Fig. 1 S-H sensor modular configuration for surface error test

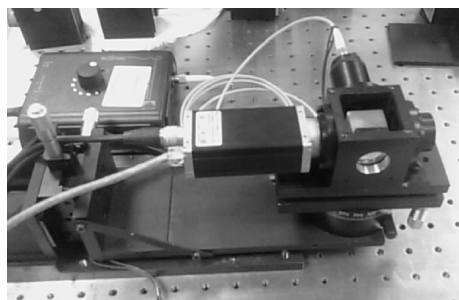


图 2 用于元件面形检测的 S-H 传感器

Fig. 2 S-H sensor for optical surface error test

1.2 元件面形测试及结果

我们在实验室内使用该传感器对 4 个凹球面反射面进行检测, 并与 Zygo 干涉仪的结果进行对比, 结果如图 3 所示。为了与被测反射面的口径和曲率半径匹配, 需要更换不同焦距的准直透镜, 每次更换后, 用标准球面反射镜进行标定, 通过设置参数

去除传感器的系统误差^[3-5]。

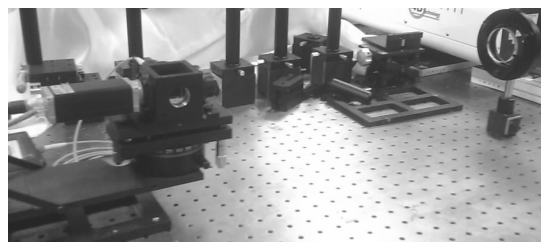


图 3 对光学元件面形的测试

Fig. 3 Optical surface error test using S-H sensor

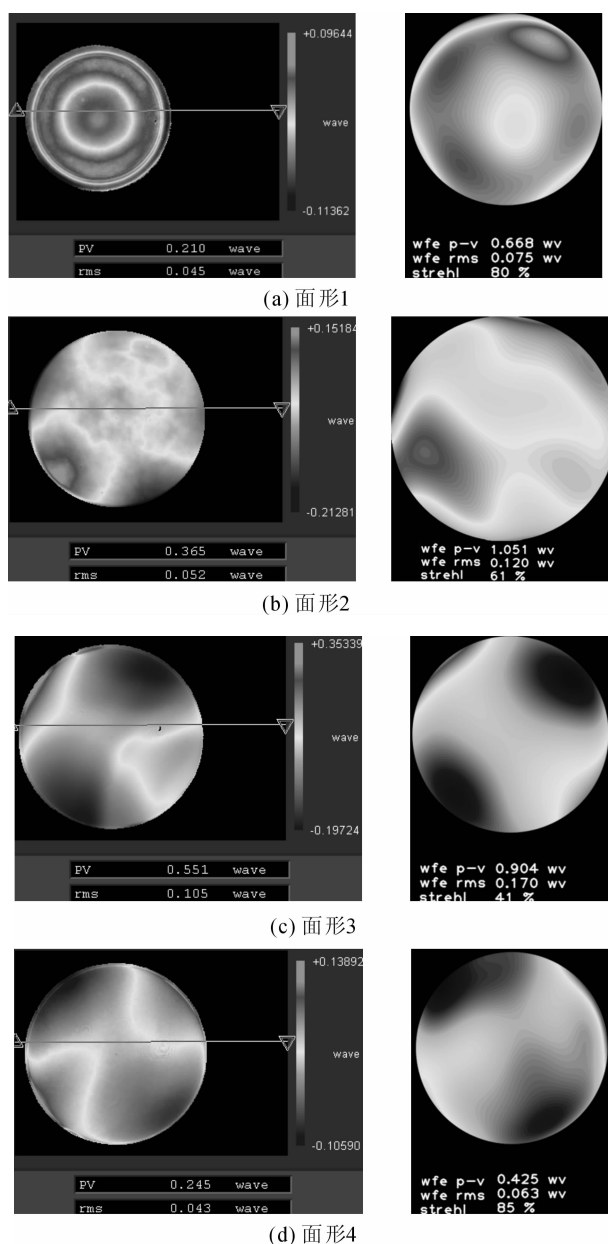


图 4 Zygo 和 S-H 对 4 个元件面形测试结果对比

Fig. 4 Result comparison of Zygo and S-H sensor for 4 surfaces test

表 1 Zygo 和 S-H 对 4 个光学元件面形测试数据

Table 1 Result of Zygo and S-H for 4 surfaces test

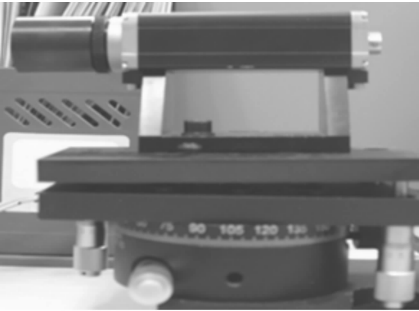
		面形 1	面形 2	面形 3	面形 4
Zygo	PV(λ)	0.210	0.365	0.551	0.245
	RMS(λ)	0.045	0.052	0.105	0.043
S-H	PV(λ)	0.334	0.525	0.452	0.212
	RMS(λ)	0.037 5	0.06	0.085	0.031

从以上结果可见,Zygo 干涉仪和 S-H 传感器测量的面形轮廓基本一致,如果以 Zygo 为基准,则 S-H 传感器的测量精度为 RMS 优于 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),PV 优于 $\lambda/6$;传感器的重复精度,即灵敏度为:RMS 优于 $\lambda/200$,PV 优于 $\lambda/30$ 。

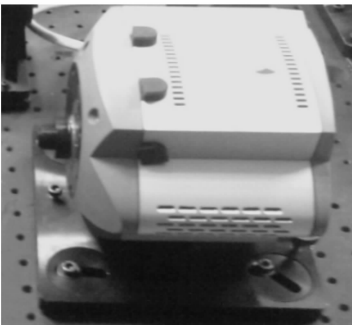
2 S-H 传感器的系统波像差检验

2.1 传感器设计

用于光学系统波像差检验的 S-H 传感器结构简单,只需要准直透镜模块、微透镜模块和 CCD 模块即可。仍采用上述的微透镜阵列,在实验室内使用时,由于可采用足够亮度的光源,因此对相机的量子效率要求不高,仍使用 Basler piA2400,传感器如图 5(a)所示。但在外场进行望远镜波像差检验时,常采用星光作为光源,由于亮度有限,因此要用高量子效率的相机,我们采用科学级相机 DU888,如图 5(b)所示。



(a) 基于Basler piA2400相机



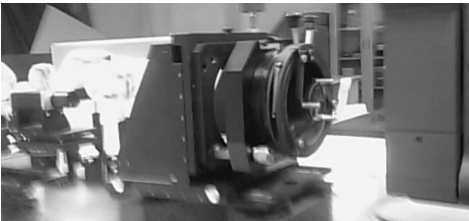
(b) 基于DU888相机

图 5 用于系统波像差检验的 S-H 传感器

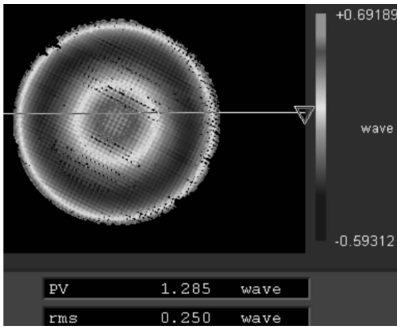
Fig. 5 S-H sensors for wavefront error test

2.2 实验室内系统波像差检验及结果

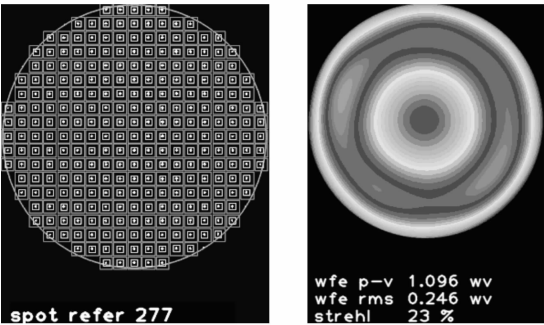
在实验室内,我们用单块透镜模拟对无穷远目标成像的光学系统,用图 5(a)的 S-H 传感器测试系统的波像差,并与用 Zygo 干涉仪自准直检验的结果相对比,结果如图 6 所示。



(a) 用哈特曼对系统波像差测试



(d) Zygo自准直检验结果



(c) 哈特曼测试结果

图 7 对系统波像差的测试结果

Fig. 7 Result of wavefront error test

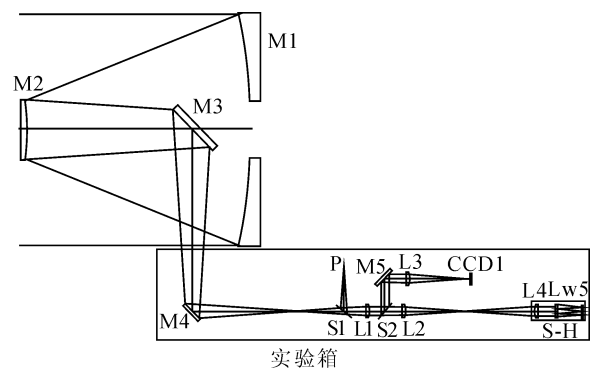
从以上结果可见,系统波像差主要为三阶球差,Zygo 测试结果为 $PV=1.285\lambda$, $RMS=0.25\lambda$; S-H 测试结果为 $PV=1.096\lambda$, $RMS=0.246\lambda$ 。

2.3 望远镜波像差的外场检验及结果

在外场环境下,我们采用图 5(b)的高探测能力 S-H 传感器,利用星光作为光源,对口径 1 m、焦距 11 m 的望远镜进行系统波像差检验。

实验光路示意图如图 8 所示。将 S-H 检测及成像光路放在实验箱中,其中 S-H 传感器的测量波段为 $0.5\text{ }\mu\text{m} \sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$,成像相机波段为 $0.7\text{ }\mu\text{m} \sim 0.9\text{ }\mu\text{m}$ 。在实验室内装调后,将实验箱与望

望远镜的 Bent-cassegrain 焦点对接,实验箱的实际光路如图 9 所示。



M1. 主镜; M2. 次镜; M3, M4, M5. 平面镜; S1. 光束分离器; S2. 滤波器; L1, L2. 中继透镜; L3. 成像透镜; L4. 准直透镜; Lw5. 小透镜; P. 光源; CCD1. 摄像机

图 8 1 m 望远镜波像差检测光路示意图

Fig. 8 Optical path of 1m telescope wavefront error test using S-H sensor

望远镜对星测试中,为平滑大气扰动影响,每帧图像积分时间取 30 s,星等选择 1.5~3 等之间的亮星。对望远镜在 24°、35°、42°、48°、54°、61°和 72°俯仰角时进行测试,测试有效点 244 个,不同俯仰角时测出的波面轮廓基本不变,如图 11 所示。从图 11 可以看出,系统像差主要为 3 阶像散。该项像差随着俯仰角增加呈增大趋势,如图 12 所示。系统波像差也随俯仰角增加而增大,为 $0.39\lambda\sim 0.46\lambda\text{RMS}$ 之间,尤其是超过 60°以后增加明显,可以得出望远镜随着俯仰角度的变化,其弯沉及主

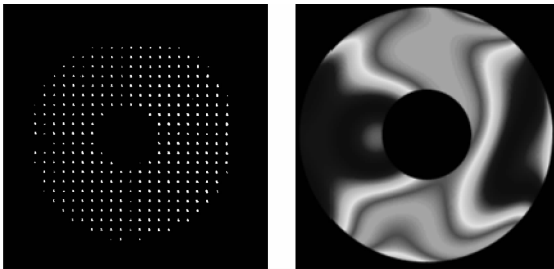


图 11 望远镜波前轮廓

Fig. 11 Wavefront contour of the telescope

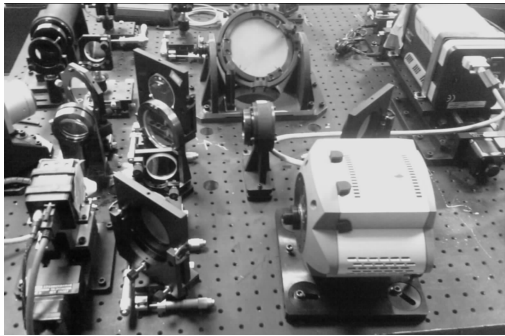


图 9 实验箱内的光路

Fig. 9 Optical path in the experiment box

对星测试前,先通过标准点光源 P 测出箱内光路的系统误差,包括装调误差、元件加工误差及 S-H 传感器误差,测试结果如图 10 所示,系统误差为 $0.193\lambda\text{RMS}$ 。将此时传感器测得的点斑质心位置作为参考,这样即可将系统误差去除,得到望远镜主系统的波像差^[6]。

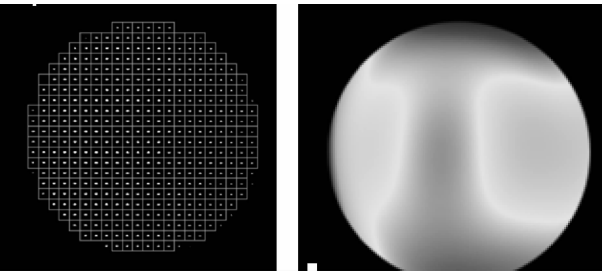
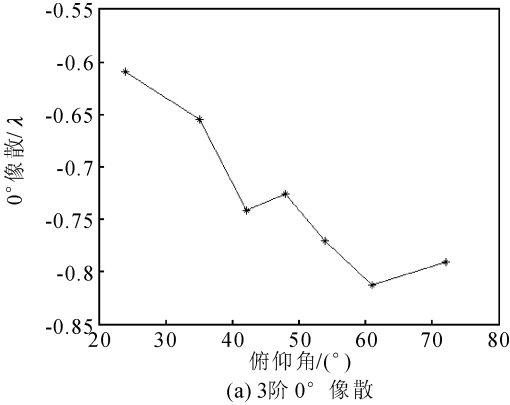
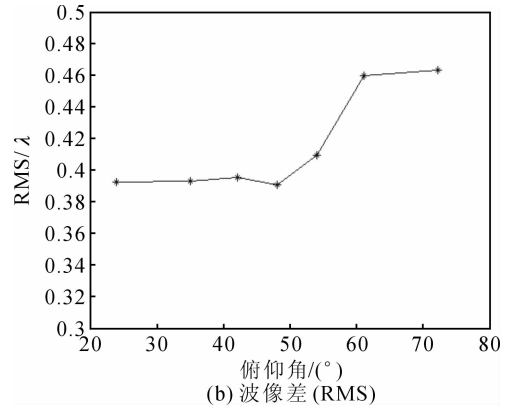


图 10 S-H 测出的实验箱内光路系统误差

Fig. 10 System error in the experiment box tested by S-H sensor



(a) 3阶 0° 像散



(b) 波像差 (RMS)

图 12 系统波像差 RMS 值及三阶像散随俯仰角的变化

Fig. 12 Changing of wavefront error with elevation angle of the telescope

镜支撑会引起像质一定的变化。S-H 传感器对望远镜波像差的测试结果可以从成像相机获得的星点像中得到定性的验证,图 13 是通过 CCD 前后移动得到的焦面前后星点像。图 13 中同时给出了此时 S-H 传感器测出的离焦量,由图 13 可以得出,系统存在较大的 0°像散,与 S-H 测量结果相符合。

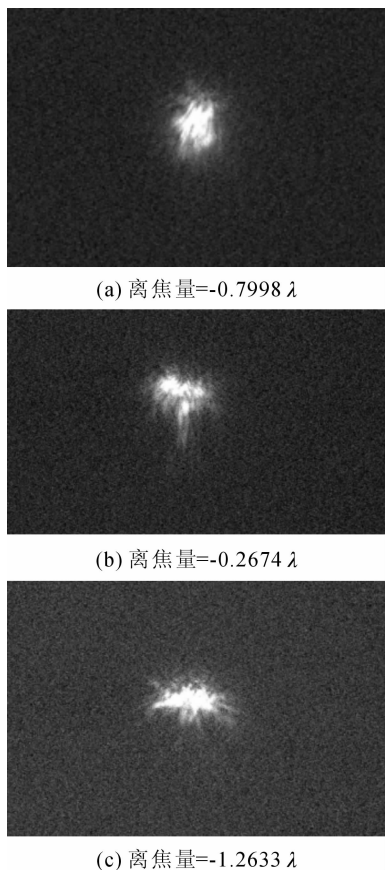


图 13 焦面前后星点像及 S-H 测出的离焦量

Fig. 3 Star images at difference image plane and corresponding defocus value tested by S-H sensor

3 结论

介绍了我们开发的分别用于光学元件面形和系统波像差检测的 S-H 传感器以及相应的检测实验。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,通过用理想光源标定,可将系统误差去除,降低了装调的难度,传感器结构紧凑,使用方便。

在实验室内,通过与 Zygo 干涉仪的测试结果对比,得出传感器的测量精度优于 $\lambda/50$ RMS。在外场环境下,利用星光作为光源,对口径 1 m、焦距 11 m 的望远镜进行了系统波像差检验,结果表明系统波像差在 $0.39\lambda \sim 0.46\lambda$ RMS 之间,并随着俯

仰角的增加而增大,主要像差为三阶像散。由成像相机所获得的焦面前后星点像进行定性判断,同样得出望远镜存在较大的低阶像散,与 S-H 的测量结果相符合。

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, D. J. ARMSTRONG, TURNER W T. Wavefront sensors for control and process monitoring in optics manufacture [J]. SPIE, 1997, 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 Hong-zhuang, WANG Jian-li, LIN Xu-dong, et al. Active optics experiment system with thin-mirror [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6):120-126. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 周文超, 彭勇, 徐宏来. 大口径光学系统综合像差外场检测的方法 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊):155-157.
ZHOU Wen-chao, PENG Yong, XU Hong-lai. Way to get integrative aberration of large aperture optical system in the outfield [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(sup):155-157. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 李宏壮, 刘欣悦, 王建立. 薄镜面面形主动校正技术研究 [J]. 应用光学, 2010, 31(1):118-123.
LI Hong-zhuang, LIU Xin-yue, WANG Jian-li. Active correction technology research of thin-mirror surface [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1):118-123. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 常山, 曹益平, 陈永权. 五角棱镜的光束转向误差对波前测量的影响 [J]. 应用光学, 2006, 27(3):186-191.
CHANG Shan, CAO Yi-ping, CHEN Yong-quan. Influence of beam turning error of pentagonal prism on wave-front measurement [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3):186-191. (in Chinese with an English abstract)