

doi: 10.3788/gzxb20124101.0039

# 大口径望远镜波像差的外场检验方法

李宏壮, 王志臣, 王富国, 张振铎, 刘欣悦

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘 要:**为在外场环境下对大口径望远镜进行系统波像差的检验, 研制了一套具有高探测能力的 Shack-Hartmann 波前传感器. 利用恒星作为光源, 对口径 1 m、焦距 11 m 的大口径望远镜进行了波像差检验实验, 测量结果为系统波像差在  $0.39\lambda \sim 0.46\lambda$  RMS 之间, 且随着俯仰角的增加而增大, 主要像差形式为 3 阶  $0^\circ$  像散, 与星点检验的结果一致.

**关键词:**大口径望远镜; 波像差检测; Shack-Hartmann 传感器

中图分类号: TH751

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0039-4

过焦面前后星点像进行星点检验的结果相符合.

## 0 引言

望远镜的口径越大, 集光能力越强、空间分辨率越高, 因此研制大口径望远镜, 在空间科学和国防军事等领域具有重大意义. 随着光学制造技术的发展, 望远镜的口径越来越大, 已经由 2~4 m 级发展到了 8~10 m 级, 甚至更大<sup>[1]</sup>. 而随着望远镜口径的增大, 其光学系统的成像质量检测也更加困难.

目前望远镜的检测方法主要是使用标准平面反射镜和干涉仪通过自准直方法进行波像差检验; 或者使用平行光管进行分辨率检验<sup>[2-3]</sup>. 但这两种方法都需要与被测系统口径相同或更大、准确度更高的标准光学设备, 这对于直径在 m 级的大口径望远镜来说是很难实现的. 另外, 望远镜在外场使用时, 由于运输过程中的震动、环境温度等的影响, 可能使其性能发生变化, 与实验室内装调检测的结果不符, 因此对望远镜的外场波像差检验是必要的.

早期的望远镜外场检验主要是通过传统的哈特曼检验方法, 测量望远镜的能力集中度或点图<sup>[4]</sup>, 无法定量给出系统的像差形式和量值. 而剪切干涉仪、泰曼-格林干涉仪等波前测量设备由于结构复杂、光能利用率低等缺点, 应用并不广泛.

Shack-Hartmann(S-H)方法不需要大口径标准元件, 且具有结构简单紧凑、抗环境扰动、实时测量等优点, 适于大口径望远镜的外场检验, 国内已经有这方面检测的构想和实例<sup>[5-6]</sup>, 但目前还没有模拟实际使用情况、对星进行系统波像差定量检验的报道.

本文通过一套自行研制的高探测能力 S-H 传感器, 在外场环境下, 模拟实际使用情况, 对口径 1 m、焦距 11 m 的望远镜不同俯仰角下系统波像差进行了测试. 得出了系统存在的主要像差形式和量值, 与通

## 1 S-H 传感器研制

为适应望远镜系统检测的需要, 本文根据光路结构, 研制一套基于高灵敏度相机 DU888 的 S-H 波前传感器, 如图 1, 传感器指标如表 1.

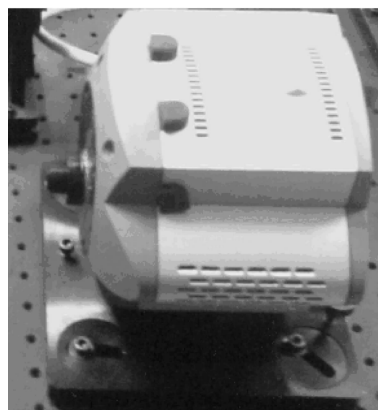


图 1 基于 DU888 的 S-H 波前传感器

Fig. 1 S-H wavefront sensor based on DU888

表 1 S-H 波前传感器指标

Table 1 Index of S-H sensor

Number of subaperture	30×30
Array pitch	300 μm
Array focal distance	8.73 mm
Camera pixel size	13×13 μm <sup>2</sup>
Active pixels	1 024×1 024
Image area	13.3×13.3 mm <sup>2</sup>
Peak quantum efficiency	0.9

S-H 传感器的主要指标有动态范围、灵敏度、测量准确度、探测速度及探测能力等<sup>[7-8]</sup>, 在天文望远镜检验中, 采用星光作为光源, 因此对传感器探测能力的要求较高, 另外对测量准确度也有一定的要求, 下面分别进行讨论.

第一作者: 李宏壮(1980—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学设计、检测、大口径望远镜波前探测等. Email: jilnbayan@163.com

收稿日期: 2011-08-04; 修回日期: 2011-10-26

### 1.1 探测能力分析

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,如图 2.

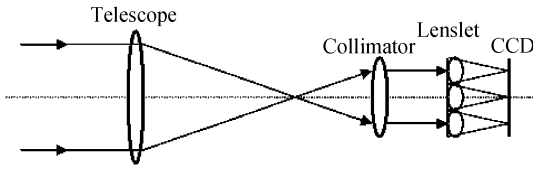


图 2 S-H 传感器对望远镜系统检测的光路  
Fig. 2 Light path of telescope test using S-H sensor

计算信噪比的公式为

$$SNR = \frac{K_e \cdot s \cdot Q}{\sqrt{(s+B) \cdot Q + (n_D \cdot t)^2 + n_r^2}} \quad (1)$$

式中  $K_e$  为处理电路引起的附加因子,  $Q$  为 CCD 量子效率,  $n_D$  为每象元每秒暗电流电子数,  $n_r$  为 CCD 读出噪音均方值;  $s$  为单个象元在单帧积分时间内获取的光电子数. 设  $M_v$  为目标星等,  $0 M_v$  在大气层外的光子流量密度为  $3.44 \times 10^{10} e^-/m^2 \cdot s$  (波段范围 450~750 nm), 则

$$s = \frac{3.44 \times 10^{10}}{2.512^{M_v}} \cdot \frac{A_s}{K} \cdot \tau_{opt} \cdot \tau_{atom} \cdot K_{CCD} \cdot t \cdot \frac{1}{N} \quad (2)$$

$\tau_{opt}$ 、 $\tau_{atom}$  分别为光学系统透过率和大气透过率,  $K_{CCD}$  为 CCD 占空比,  $t$  为积分时间,  $N$  为光瞳内的哈特曼传感器子孔径数,  $A_s$  为望远镜入瞳面积,  $A_s = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ ,  $D$  为望远镜口径,  $K$  为目标在象面上的分散系数, 设每个子孔径形成的光斑 80% 能量集中在  $n \times n$  象元, 则

$$K = (n \times n)^{-1} \quad (3)$$

$B$  为单个象元在积分时间内获得的天空背景光电子数, 设  $0 M_v/sec^2$  的天空背景的光子流量密度按  $3 \times 10^{10} e^-/m^2 \cdot sec^2 \cdot s$  (波段范围 450~750 nm), 则

$$B = \frac{3.44 \times 10^{10}}{2.512^{M_{vb}}} \cdot A_s \cdot A_p \cdot \tau_{opt} \cdot K_{CCD} \cdot t \cdot \frac{1}{N} \quad (4)$$

$M_{vb}$  为用星等表示的天空亮度,  $A_p$  为单个象元在特定的光学系统下承担的角面积.

$$A_p = \left( \frac{P \cdot f_1}{f_2} \cdot \frac{1}{f} \cdot 206265 \right)^2 \quad (5)$$

式中  $P$  为 CCD 的象元尺寸,  $f_1$  为准直透镜焦距,  $f_2$  为微透镜焦距,  $f$  为 S-H 准直透镜前像点的等效焦距.

由以上公式, 给定望远镜口径、焦距及哈特曼传感器的指标, 就可推算出 S-H 传感器能够探测到的极限星等. 由以上公式计算得出在积分时间 30 s 时, 则可探测的极限星等为 7.3 等. 因此该传感器具有较高的探测能力, 满足望远镜检测的要求.

### 1.2 测量准确度和重复准确度测试

采用如图 3、4 所示光路对光学元件的面形误差进行测量, 并与 Zygo 干涉仪的测量结果相对比, 从

而得出 S-H 传感器的测量准确度和重复准确度<sup>[9-10]</sup>.

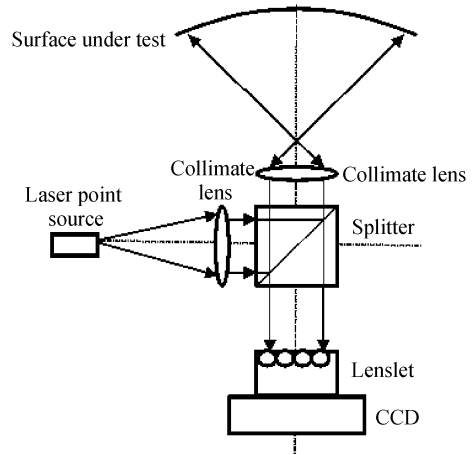


图 3 S-H 光学元件面形检测的光路  
Fig. 3 S-H sensor configuration for surface error test

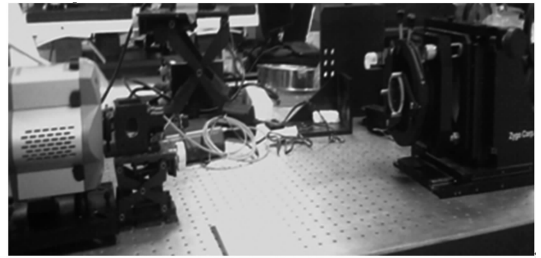


图 4 对光学元件面形的测试

Fig. 4 Optical surface error test using S-H sensor

对两个光学表面进行了测试, 测量结果如图 5 所示.

测试结果表明, 传感器测量准确度可达  $\lambda/30$  RMS. 通过对同一被测镜多次测量, 得出重复准确度可达  $\lambda/100$  RMS. 满足望远镜检测的准确度要求.

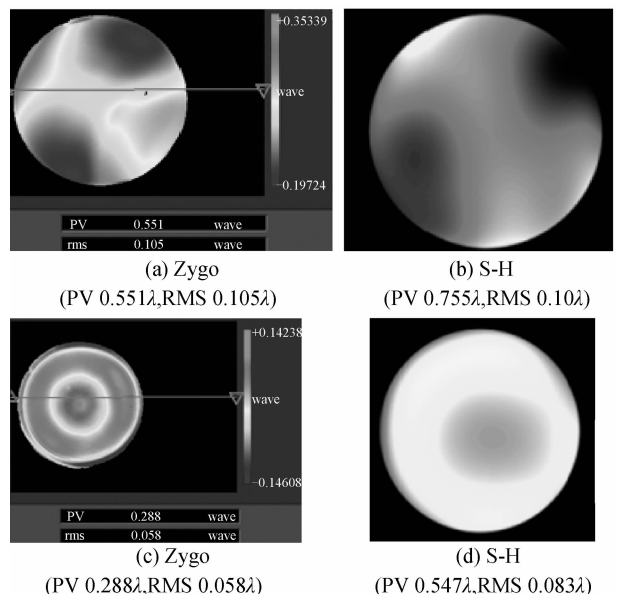
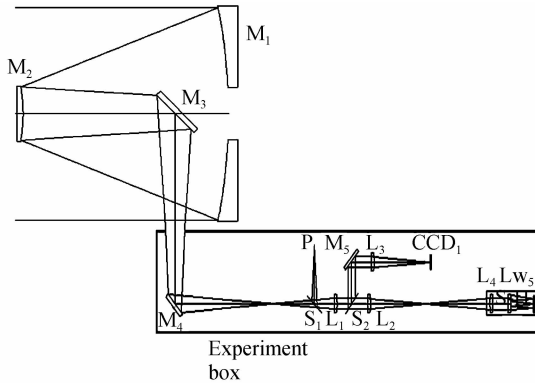


图 5 分别对两个光学表面面形的检测结果

Fig. 5 Result contrast of zygo and S-H sensor for 2 surfaces test

## 2 系统装调

实验光路示意图如图 6,将 S-H 检测及成像光路放在实验箱中,S-H 传感器测量波段为  $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ,成像波段为  $0.7 \sim 0.9 \mu\text{m}$ . 在实验室内装调后,将实验箱与望远镜的 Bent-cassegrain 焦点对接,实验箱的实际光路如图 7.



$M_1$ -primary mirror;  $M_2$ -secondary mirror;  $M_3, M_4,$   
 $M_5$ -flat mirror;  $S_1$ -beam splitter;  $S_2$ -filter;  $L_1,$   
 $L_2$ -relay lens;  $L_3$ -imaging lens;  $L_4$ -collimate lens;  
 $Lw_5$ -lenslet; P- point source;  $CCD_1$ -imaging camera

图 6 1 m 望远镜波像差检测光路示意图

Fig. 6 Optical path of 1 m telescope wavefront error test

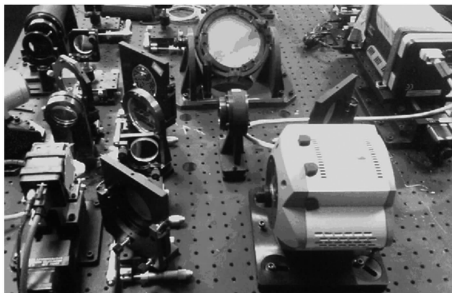


图 7 实验箱内的光路

Fig. 7 Optical path in the experiment box

装调完成后,通过标准点光源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 传感器自身的误差,结果如图 8,系统误差为  $0.193\lambda$  RMS,将此时传感器测得的点斑质心位置作为参考,即可去除系统误差.

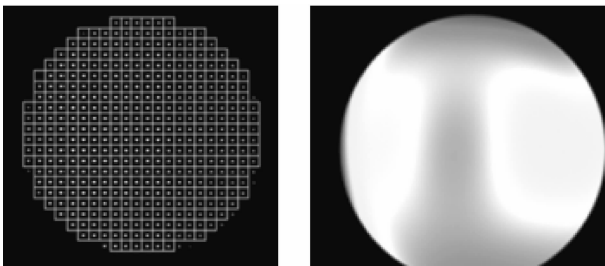


图 8 S-H 测出的实验箱内光路系统误差

Fig. 8 System error in the experiment box tested by S-H

## 3 望远镜波像差测试

对恒星测试中,为提高图像的信噪比,选择 1.5 等到 3 等之间的亮星. 每帧图像积分时间取 30 s 以平滑大气扰动的影响,实际测试有效点为 244 个.

对望远镜在  $24^\circ, 35^\circ, 42^\circ, 48^\circ, 54^\circ, 61^\circ$  和  $72^\circ$  俯仰角下进行了测试,不同俯仰角时测出的波面轮廓基本不变,如图 9,不同俯仰角的波像差(3 阶像差)测试数据如表 2. 可以看出系统像差主要为 3 阶  $0^\circ$  象散,随俯仰角增加,该象散值也增大,同时系统波像差也随之增大,在  $0.39\lambda \sim 0.46\lambda$  RMS 之间,如图 10. 尤其是超过  $60^\circ$  以后增加明显,可以得出望远镜随着俯仰角度的变化,其弯沉及主镜支撑会引起像质一定的变化.

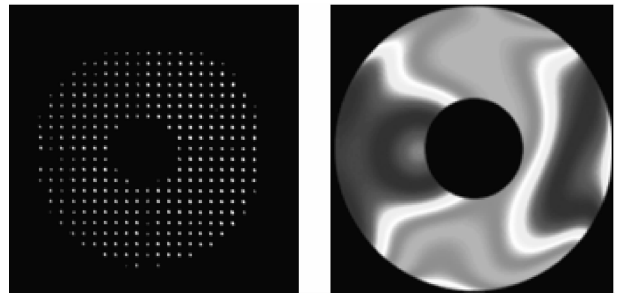


图 9 望远镜波前轮廓

Fig. 9 Wavefront contour of the telescope

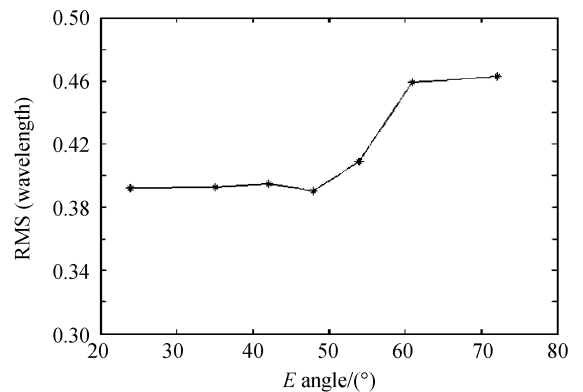


图 10 系统波像差 RMS 随俯仰角的变化

Fig. 10 Changing of wavefront error with elevation angle

表 2 不同俯仰角的波像差测试数据( $\lambda$ )

Table 2 Wavefront error data under different elevation angle

Elevation angle	$24^\circ$	$35^\circ$	$42^\circ$	$48^\circ$	$54^\circ$	$61^\circ$	$72^\circ$
$0^\circ$ Astig	-0.61	-0.66	-0.74	-0.73	-0.77	-0.81	-0.79
$45^\circ$ Astig	-0.21	-0.43	-0.30	-0.28	-0.30	-0.41	-0.34
x coma	-0.12	-0.15	-0.01	-0.22	-0.21	-0.32	-0.42
y coma	-0.08	0.06	0.03	0.18	0.20	0.25	0.40
x tri	-0.20	-0.14	-0.04	0.00	-0.01	-0.05	-0.05
y tri	0.00	-0.01	0.03	-0.02	0.02	-0.04	-0.01
sph3	0.50	0.22	0.08	0.01	-0.06	-0.15	-0.20
RMS	0.39	0.39	0.40	0.39	0.41	0.46	0.46

通过相机前后调焦得的焦面前后的星点像, 对望远镜进行定性的星点检验, 如图 11, 图中同时给出了此时 S-H 传感器测出的离焦量, 由图可见, 系统存在较大的  $0^\circ$  象散, 与 S-H 测量结果相符合。

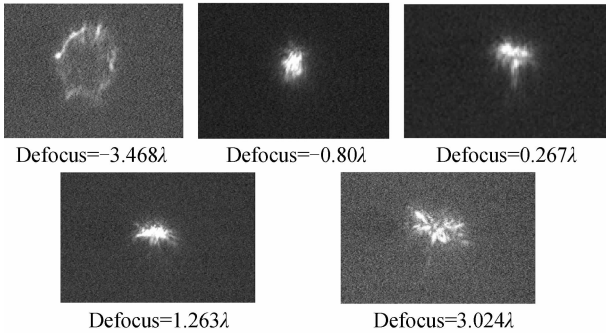


图 11 焦面前后星点像及 S-H 测出的离焦量  
Fig. 11 Star images at difference focal plane and corresponding defocus value tested by S-H sensor

## 4 结论

本文采用一套自行研制的高探测能力 Shack-Hartmann 传感器, 在外场环境下利用恒星作为光源, 对口径 1 m、焦距 11 m 的大口径望远镜进行了系统波像差检验, 实验中采选择 1.5 等到 3 等之间的亮星, 通过每帧 30 s 的积分时间来平滑大气扰动的影响, 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 3 阶  $0^\circ$  象散, 与望远镜用星点检验的结果一致。

实验表明, Shack-Hartmann 方法测量大口径望远镜系统波像差具有外场环境适应性强、不需要高准确度大口径的检测设备等特点, 并可对望远镜在不同俯仰角状态下测试, 具有传统干涉仪检验所不具备的优势。

### 参考文献

[1] WANG Jian-li, CHEN Tao, ZHANG Jing-xu. General requirements and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(Special): 1-16.

王建立, 陈涛, 张景旭. 地基高分辨光电成像望远镜总体需求分析及关键技术分析[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(专辑): 1-16.

[2] ZHANG Wei, CAO Yi-ping. A wave-front measuring method for large scale telescope system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2): 205-209.  
张维, 曹益平. 一种大型望远系统波前检测的方法[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(2): 205-209.

[3] LIN Jing, LIU Zhong, JIN Zhen-yu. High-resolution image reconstruction technology applied to the optical testing of ground-based astronomical telescopes [J]. *Astron. T&T-PNAOC*, 2004, **1**(3): 188-195.  
林京, 刘忠, 金振宇. 天文高分辨像复原技术检测地基天文光学望远镜成像质量[J]. *天文研究与技术-国家天文台台刊*, 2004, **1**(3): 188-195.

[4] WANG Yi-ming, QIN Song-nian. The test of light energy concentration for 1m reflector at Yunnan observation[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1981, **22**(3): 310-314.  
王义名, 秦松年. 云南天文台一米望远镜光能量集中度检验[J]. *天文学报*, 1981, **22**(3): 310-314.

[5] 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.  
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.

[6] MA Pin-zhong. Shack-Hartmann wavefront sensor for 4.3m telescope[J]. *Optical Technique*, 1994, **20**(3): 28-30.  
马品仲. Shack-Hartmann 法在 4.3 米望远镜中的应用设计[J]. *光学技术*, 1994, **20**(3): 28-30.

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

[8] NEAL D R, COPLAND J, NEAL D. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy [C]. *SPIE*, 2002, **4779**: 148-160.

[9] LI Hong-zhuang, LIU Xin-yue, WANG Zhi-chen, et al. Develop of multi-application and modular Hartmann wavefront sensor[J]. *Optical Technique*, 2011, **37**(3): 362-365.  
李宏壮, 刘欣悦, 王志臣, 等. 多用途、模块化哈特曼波前传感器的研制[J]. *光学技术*, 2011, **37**(3): 362-365.

[10] WU Jia-jie, CHEN Jia-bi, XU An-cheng, et al. Focal length measurement based on hartmann-shack principle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 912-915.  
吴佳杰, 陈家璧, 徐安成, 等. 基于哈特曼-夏克波前测量原理的焦距测量[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 912-915.

## Method of Wavefront Error Test in the Outfield for Large Aperture Telescope

LI Hong-zhuang, WANG Zhi-chen, WANG Fu-guo, ZHANG zhen-duo, LIU Xin-yue

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** For testing the wavefront error of large aperture telescope in the outfield, a Shack-Hartmann wavefront sensor with high detect ability was developed. Using star as light source, the wavefront error of the telescope with 1 m diameter and 11 m focal length was test through the sensor. The results show that the wavefront error of the telescope is about  $0.39\lambda \sim 0.46\lambda$  RMS, and the error increases as the elevation angle of the telescope. The dominating aberration is 3rd  $0^\circ$  astigmatism, and the result is identical to that of star test.

**Key words:** Large aperture telescope; Wavefront error test; Shack-Hartmann wavefront sensor