文章编号:1002-2082(2014)01-0001-06

"宋"望远镜夏克哈特曼光学系统设计

寇松峰^{1,2},刘根荣^{1,2},牛冬生^{1,2},叶 宇^{1,2},王国民^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台 南京天文光学技术研究所,江苏 南京 210042;

2. 中国科学院天文光学技术重点实验室,江苏 南京 210042)

摘 要:根据中国"宋"标准节点望远镜系统要求,设计了用于望远镜波前误差测量的夏克哈特 曼(S-H)传感器光学系统。从望远镜衍射极限成像和观测星等要求出发,对 S-H 的采样点数选取 和波面重建精度进行分析计算,根据所选微透镜阵列和"宋"望远镜光学参数进行 S-H 准直镜的消 像差设计,采用两组双胶合透镜实现了 480 nm ~ 680 nm 波长范围的系统衍射极限成像。设计的系 统能够实现 6 等星的目标测量,测量精度 0.05"。根据设计结果搭建了实验系统,对主镜初始状 态和校正之后的波前误差进行了测量,并将 S-H 测量结果与 4D 干涉仪测量结果进行了比较。 实验结果表明:所设计 S-H 系统测量精度 0.008 μ m(RMS),能够满足"宋"望远镜的技术要求。 关键词:光学设计;夏克哈特曼;主动支撑;对比测量

中图分类号:O439;TH703 文献标志码:A doi:10.5768/JAO201435.0101001

Design of SONG Shack-Hartmann optical system

KOU Song-feng^{1,2}, LIU Gen-rong^{1,2}, NIU Dong-sheng^{1,2}, YE Yu^{1,2}, WANG Guo-min^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical

Optics & Technology, CAS, Nanjing 210042, China; 2. Key Laboratory of Astronomical

Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,

CAS, Nanjing 210042, China;)

Abstract: In this paper, we gave an optic design of stellar oscillations network group (SONG) Shack-Hartmann (S-H). The optical system and main parameters of S-H were determined, mainly according to the demands of diffraction limited imaging quality and magnitude of the telescope; According to the optical parameters of SONG and the micro lens array, an eliminating aberration design was carried out based on two doublets; The performance of the S-H was within diffraction limit. Designing results showed that the 6th magnitude and accuracy of 0.05" could be achieved. Based on the design results, an experimental system was built. A comparative study on measuring accuracy between S-H and 4-D interferometer was carried out. The experimental results showed that the measuring accuracy of S-H is 0.008 μ m which could meet the requirements of Chinese SONG telescope.

Key words: optical design; Shark-Hartmann; active support; contrastive measurement

引言 中国"宋"项目标准节点望远镜(以下简称 SONG望远镜)是一台口径1m、F36.7的地平式 望远镜,是国际合作 SONG(stellar oscillations network group)项目的重要组成部分,其主要科学目标有两条^[1,2]:

收稿日期:2013-06-26; 修回日期:2013-07-07

基金项目:国家自然科学基金(11273040)

作者简介:寇松峰(1971一),男,河南上蔡人,博士,副研究员,主要从事天文光学新技术方面的研究。

E-mail: sfkou@niaot.ac.cn

1) 采用高分辨率光谱成像进行恒星的星震学 研究;

2)进行幸运成像研究,通过微引力透镜现象
 寻找系外行星。

所谓幸运成像就是利用望远镜快速获取大量短 曝光图像,从中选取高信噪比的部分,通过配准、叠 加等算法进行处理,最终得到高分辨率的图像^[3]。 由于短曝光图像不存在积分效应引起的图像模糊, 所以其中包含了被观测目标的高分辨率信息,使得 高质量图像重构成为可能。为了提高短曝光图像的 像质,同时又不损失科学仪器终端接受到的光能量, SONG 望远镜采用了主镜主动支撑技术,以保证望 远镜 80 % 能量集中在 0. 3"范围内。不同于实时在 线的主动光学技术,该方法是在望远镜的一个耐氏 焦点上安装了夏克哈特曼(S-H),另一个耐氏焦点 上安装科学仪器如图1所示。在观测工作开始前 使用 S-H 三镜(M3)之后的波面误差进行检测和 校正。校正完成后,M3 镜旋转 180°将光线引入科 学仪器进行观测。观测过程中,支撑装置通过采 集高度轴数据实现主镜面型校正的开环控制。

SONG S-H 需要以自然星为目标,实现望远 镜波前误差测量。为了满足望远镜接近衍射极限 成像质量的检测需要,S-H 光学设计像质应达到 衍射极限,并能够消除准直镜焦距误差、微透镜阵 精度等造成的系统误差,测试精度应高于 0. 125″。







1 关键参数选取

S-H 光学系统的设计关键在于保证仪器的测 量精度和观测星等。对于固定口径的天文望远 镜,采样点数正比于测量精度,反比于子孔径。采 样点数越多,可用于拟合的数据就越多,拟合得到 的面形精度越高。子孔径大小决定了夏克哈特曼 的观测星等,子孔径越大,每个子孔径内收集到的 光子越多,观测星等就越高。所以采样点数和观 测星等是一对矛盾,在光学设计时要兼顾这2个方 面^[4-6]。

确定 S-H 采样点数,首先需要对 SONG 望远 镜入瞳面型进行不同采样率的采样和拟合,计算 出拟合的残差。对于一个回转对称的光学系统来 说,物体位于子午面内,因而波前像差对于 YZ 面 是对称的,只有 θ 的偶函数(余弦项)项是非零项。 中国"宋"项目望远镜主镜采用薄镜面主动支撑, 其波前是不对称的,同时包含两种三角函数形式, 所以采用标准 Zernike 多项式描述。

采用 S-H 进行波前误差测试时,测量的是微 透镜阵的像斑点相对于理想位置的偏移量,通过 微分的方法得到波面的斜率。在进行采样点数选 取的仿真与计算时,我们直接对波面进行采样和 拟合,计算出不同采样点数时的残差,以确定维持 波面面型所需的最小采样点数。将表 1 中的 Zernike 项系数均取作 1,采样点数 200×200,极坐 标归一化处理,从而得到原始波面。采样点数量 范围为 100~1 600,归一化后采用最小二乘法进 行拟合,得到残差与 Zernike 系数(前 8 项与第 11 项)。从仿真结果可以看出, 10×10 和 15×15 两 种情况下,采样点数不足造成了拟合误差较大,随 着采用点数的增加拟合误差逐渐减小。采用 20× 20 以上的微透镜阵列,拟合得到的残差和 Zernike 系数拟合精度已经能够满足系统需要,所以 20× 20 即为 S-H 最小采样点数。

	表 1	泽尼克系数与残差
Table 1	Zenike	coefficients and residual errors

	采样	残差(λ)	译尼克系数								
庁ち	点数		Z(1)	Z(2)	Z(3)	Z(4)	Z(5)	Z(6)	Z(7)	Z(8)	Z(11)
1	10 imes 10	1.517	-0.269	-0.471	0.113	0.003	0.187	0.557	0.629	0.389	0.755
2	$15\! imes\!15$	1.519	-0.235	-0.173	-0.173	0.0184	0.124	1	0.503	0.503	0.752
3	20×20	3.3e-4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998	0.9998	1	0.9999	0.9999	0.9999
4	30×30	6.2e-6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	$40\! imes\!40$	2.3e-7	1	1	1	1	1	1	1	1	1

最小采样点数确定后,需要对其对应的子孔 径观测星等进行计算。考虑到 SONG 望远镜主要 用于恒星的星震学研究,其观测星等最高在 6 等, 如果 S-H 能够直接采用 6 等星的目标标定,其效 率和效果都将得到有效的提升,故将 6 等星作为子 孔径的设计指标。

在天文观测中,光学望远镜对空间某一天体 的聚光本领可以表示为^[7]

$$N(t) = Q \cdot A \cdot t \cdot \Delta \lambda \cdot n_{b} \tag{1}$$

式中:Q是望远镜和接收器的综合量子效率;A 是 望远镜的口径面积;t 是望远镜观察的积分时间; Δλ 是望远镜观察的频谱宽度;n_p 是单位时间、单 位面积、单位频宽的目标天体发出的到达地球表 面的光子数。

目标星在 CCD 子孔径区域内的光子流量由以 下公式给出^[8]:

$$N_{o} = N_{\text{zeromag}} \times 10^{-0.4m(\text{obj})} \left[1 - \left(1 + \frac{R^{2}}{x^{2}} \right)^{1-y} \right] \times t \times se_{(e^{-1}s^{-1}m^{-2})}$$

(2)

式中: $N_{zeromag}$ 是特定波段 0 等星的光子流量(单位: 光子数/s);对于天体中的零等星,在标准可见光 V 波段范围内,每平方厘米每秒到达大气外层空间 的光子数大约为 1007^[7],考虑到 S-H 在主镜上的 子孔径为 50 mm,取 $N_{zeromag} = 19$ 772;m(obj)是目 标星本系统的大气内星等;t 为曝光时间(单位: s);se 是观测系统的响应(对于 SONG S-H 取 0,45);R 为子孔径对应的视场(单位:所占像素 值),对于 SONG S-H,R=20;x,y 为 Moffat 函数 中的参数;x 与视凝度有关(x=0.5FWHM),y 与 目标星的类型有关(point source:y=3.8; galaxies:y=2.5; nearby galaxies:y=1.8),px=2.8。 根据公式(2)及其参数,计算出每个子孔径每秒钟 接收到的光子数大约为 35 个。

考虑到测试目标为比较亮的六等星,所以我 们忽略了背景光噪声。对于微弱光成像,器件的 暗电流是影响信噪比的关键因素。目前工业级的 CCD 暗电流噪声在(0.1~0.5)e/pixel/s 左右。可 以计算出积分时间 10 s 条件下,CCD 图像的信噪 比 SNR=30 dB ~45 dB。

根据拟合精度与积分时间、信噪比计算的计算结果,SONG S-H 选用 20×20 微透镜阵列是系统的最佳选择。

2 光路设计

SONG 望远镜是一台高精度的无人值守望远 镜,S-H 的设计需要满足高精度、全自动两项基本 要求,所以 S-H 设计了自校准和监测光路如图 2 所示。S-H 光学系统包含了折轴反光镜(1)、校正 光纤(2),准直镜(3),分光镜(4),微透镜阵(5),监 测物镜(7)和 2 个工业 CCD(6,8)。其中校正光纤 能够自动切入/切出光路,用于消除 S-H 自身的系 统误差。监测光路(1,3,4,7,8)对被测目标高精 度成像,用于导引望远镜精确对准被测目标,并能 进行系统初级像差的判断。测量光路(1,3,4,5, 6)用于实现波前误差的准确测量。监测光路和测 量光路本身像质都达到了衍射极限成像(3,4,5)。



图 2 S-H 光学系统

Fig. 2 Optical layout of Shark-Hartmann wave sensor

S-H 准直光路采用两片双胶合透镜,焦比 F36.7,焦距 366.98 mm,出瞳直径 10 mm,出瞳距 离 90 mm,工作波段 480 nm~650 nm。S-H 工作 时仅需要中心视场光线,考虑到折轴镜 M3 的定位 误差、定标点光源的移入移出误差、S-H 的装调误 差等因素,准直镜的视场设计为 ± 5 ",其点列图如 图 3 所示。微透镜阵列放置在准直光路的出瞳上, 微透镜阵列数量 20×20,单个透镜通光口径 0.5 mm,焦距 32.8 mm。微透镜阵对应波长 $\lambda = 500$ nm 的爱里斑直径 0.08 mm,与该小透镜直径的比 值为 K = 0.16,其测量精度与测量范围配置比较 合理^[5]。



Fig. 3 Spots of collimator 将 S-H 光路与望远镜 F36.7 焦点对接,在测

量 CCD(序号 6)处的点列图如图 4 所示。



图 4 S-H 点列图

Fig. 4 Spots of S-H

选取像平面比例尺,使其显示出单个微透镜 阵列像斑如图 5 所示。



图 5 单个微透镜阵点列图

```
Fig. 5 Spots of single micro-len
```

最终设计得到的 S-H 主要技术参数如表 2 所示。

表 2 S-H 主要技术参数

Table 2	Shark-Hartmann	wave	sensor	narameters
	Shark martinann	wave	SCHSUI	par ameters

1	F 数	36.67
2	焦距 /mm	366.98
3	出瞳直径/mm	10
4	透镜阵列焦距/mm	32.8
5	艾里斑直径(λ= 500 nm)/mm	0.08
6	子孔径/mm	50
7	CCD 尺寸/pixel	$2 k \times 2 k$
8	CCD 像元 /µm 0.	007 $4 \times 0.007 4$

S-H 的检测精度 $\Delta \theta$ 可以表示为

$$\Delta \theta = \frac{\Delta R \times \beta \times \frac{f' \ast}{f' \cdot 4}}{f' \cdot 5000} \times 206\ 265 \tag{3}$$

式中: ΔR 是 CCD 定位精度; β 是缩焦镜的缩焦倍 率; f'_{μ} 、 f'_{η} 、 f'_{SONG} 分别表示准直镜焦距、微透镜 阵列焦距和 SONG 望远镜焦距。采用表 2 的参数,将各参数代入公式得到波前检测精度 0. 05"。 3 **实验验**证

实验装置如图 6 所示。采用 500 mm 主镜,与 SONG 望远镜相同的主动光学执行元件、微透镜 阵列、CCD、光纤、光源等器件,主要目的是验证设 计精度及所选器件精度是否能够达到设计指标的 要求。实验数据处理按照 CCD 图像获取,像斑质 心计算,泽尼克多项式拟合,支撑校正的流程进 行,实验结果如图 7~图 13 所示。



图 6 实验装置 Fig. 6 Experimental system



图 7 原始图像 Fig. 7 S-H images

图 7 左侧为采用校正光纤时 CCD 采集到的微 透镜阵列焦平面图像,右侧为采用测量光纤照明, 经被测主镜反射后的图像。对两幅图像进行图像 处理,计算出每一个光斑的质心坐标,运算后即可 得到由被测主镜面型误差引起的像斑中心偏移。 S-H 波前斜率算法很多,我们在实验中采用了 Matlab 自带的最小二乘法进行泽尼克多项式拟 合,得到被测主镜的面型误差。





了 165 幅经过主镜反射的 CCD 图像,计算出相邻 两幅图像之间的光斑质心变化量的均方根值(图 8)最大值 0.6 μm,最小值 0.001 μm。该误差包含 了震动、气流扰动误差和图像处理误差。

采用上述图像与标准光纤图像进行比较,计 算出球面反射镜的波前误差,平均后与 4D 干涉仪 测量结果进行比较,如图 9 所示。图 9(a)为采用 4D 干涉仪的测量结果,图 9(b)为采用 S-H 的测量 结果。

从图 9 中可以看出,未进行校正时,主镜存在 较大的像散,这主要是由于主镜是侧向放置的。S-H 的测量结果 RMS 值与干涉仪的测量结果基本 一致,PV 值仅有干涉仪测量值的一半左右。造成 这种情况的主要原因是 S-H 有效采样点数只有 300 多个,远小于干涉仪的测量点数,所以 S-H 的 子孔径远大于干涉仪,这就相当于对干涉仪子孔 径内的峰-谷数据进行了平均,所以 S-H 的 PV 值 小于干涉仪 2 点或者 20 点平均的 PV 值,但其均 方根值的描述是准确的。



Fig. 9 Wavefront error before deformation

根据测量得到的初始面型及主动支撑刚度矩 阵对面型进行校正,分别采用 4D 干涉仪和 S-H 对 校正后的面型进行测量,如图 10 所示。图 10(a) 为采用 4D 干涉仪的测量结果,图 10(b)为采用 S-H 的测量结果。从图 10 可以看出,主镜面型得到 了很好的校正,其 RMS 值由原来的 0. 144 μ m 降 低到了 0. 036 μ m。S-H 测量得到的波前误差无论 是形状还是 RMS 值都能很好地与干涉仪测量结 果吻合,两者之间的差值为 0. 008 μ m(0. 03[″])。这 个结果略高于采用公式(3)的计算结果(0. 05[″]),其 原因在于定位精度 ΔR 的选择。计算时 ΔR 采用 经验值(1/10 pixel),在实验室的定位精度要高 一些。



图 10 校正后的主镜波前误差 Fig. 10 Wavefront error after deformation

4 结论

本文根据 SONG 望远镜的系统要求,开展了 S-H 的光学设计。所设计的 S-H 具备无人值守条 件下的系统误差校正功能,像质达到衍射极限。 建立实验装置对设计的系统误差校正、微透镜阵 列选取及波前误差拟合与重建等关键技术进行了 验证和测试。S-H 与 4D 干涉仪的对比测量结果 表明,该 S-H 测量精度 0.008 μ m(均方根值),能 够满足宋望远镜波前误差的测量需要。

参考文献:

- [1] 国家天文台. SONG 中国标准节点望远镜系统方案 设计任务书[M].北京:国家天文台,2006.
 National Astronomical Observatory. SONG telescope system China standard node design task book[M].
 Beijing: National Astronomical Observatory, 2006.
 (in Chinese)
- [2] Anton Norup Sorensen. SONG general optical layout and functions: SONG-TRE-3400-0047[M]. US:[s. n], 2009.
- [3] FRIED D L. Probability of getting a lucky short exposure image through turbulence[J]. Optical Society of America Journal, 1978, 68:1651-1658.
- [4] CUI Xiang-qun, SU Ding-qiang, LI Guo-ping, et al. Experiment system of LAMOST active optics [J].

SPIE, 2004, 5489: 974-985.

- [5] SU Ding-qiang, JIANG Sheng-tao, ZHOU Wei-yao, et al. Experiment system of thin-mirror active optics[J]. SPIE, 1982,2199: 609-621.
- [6] SU Ding-qiang, ZOU Wei-yao, ZHANG Zhen-chao, et al. Experiment system of segmented-mirror active optics[J]. SPIE, 2000,4003: 417-425.
- [7] 程景全.天文望远镜原理和设计[M].北京:中国科 学技术出版社,2003.
 CHEN Jing-quan. Principles of astronomical telescope design [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 易卫敏,陈东,王传军. 2.4 m 望远镜曝光时间计算
 器的设计和实现[J].天文研究与技术,2010,7(3):
 253-260.

YI Wei-min, CHEN Dong, WANG Chuan-jun. An exposure time calculator for 2.4 m telescope of the Yunnan observatory[J]. Astronomical Research &. Technology, 2010, 7(3): 253-260. (in Chinese with an English abstract)