

一米太阳望远镜多波段光谱仪的装调误差分析

付 玉¹ 程向明¹ 袁 沫^{1,2} 徐 稚¹

(¹中国科学院国家天文台/云南天文台, 云南 昆明 650011)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在光谱仪设计及误差分析理论的基础上,提出了一种基于数值模拟的系统装调误差分析方法。利用光线追迹方法分析了一米太阳塔多波段光谱仪系统中狭缝、光栅、准直镜和成像镜的安装误差对光学系统像质的影响。分析结果表明,狭缝倾斜 0.5° 范围内可以调整准直镜倾斜来校正其引入的彗差;狭缝自旋小于 $10''$ 使谱线倾斜小于 1 pixel;准直镜的离焦小于 ± 10 mm,可以通过调整 CCD 的位置进行补偿,并给出了光谱仪观测结果。

关键词 光学器件;装调;一米太阳望远镜;多波段光谱仪;误差分析;数值模拟

中图分类号 P111.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s208007

Error Analysis of Adjusting and Alignment for Multiband Spectrometer of One Meter Solar Telescope

Fu Yu¹ Cheng Xiangming¹ Yuan Shu^{1,2} Xu Zhi¹

(¹Yunnan Observatory of National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on the theory about the design of spectrometer and error analysis, a method about error analysis for system alignment is proposed. By using Zemax software, the alignment error on the image quality is analyzed. The result indicates that the tilt and tip of slit is less than 0.5° , then the coma involved can be depressed by adjusting the collimating mirror; the self-rotating of slit less than $10''$ can make the slant of spectrum lines less than one pixel; By adjusting the position of CCD, ± 10 mm the defocus of collimating mirror is compensated. Then, the observed result is given.

Key words optical devices; adjusting; 1 m solar telescope; multi-spectroscopy; error analysis; simulation

OCIS codes 120.4640; 120.4820; 120.4880; 120.6200; 300.6190; 300.6320

1 引 言

一米红外太阳望远镜是我国 21 世纪初进行太阳物理研究的主要观测仪器,其终端设备之一的多波段垂直光谱仪可进行太阳光谱观测,并提供有关太阳活动区结构分层光谱数据,对太阳活动区磁场时空精细结构及演化的研究有极其重要的意义^[1]。大部分光谱仪多为水平光谱仪,安装调试平台为平面,且具备结构紧凑、体积小等特点,所以利用传统的安装调试方法和工具便可以达到很高的装调精度^[2~4]。而多波段光谱仪使用了垂直吊篮式的机械

结构,装调工作集中在长 5 m、宽 0.5 m 的横梁上,即多波段光谱仪的中平台。针对光谱仪安装环境恶劣和光谱仪体积庞大、结构特殊等特点,本文利用光线追迹方法分析了光学系统各个元件的安装误差对整个光机系统的影响,并给出了光谱仪各个光学元件在装调过程中能够接受的安装误差范围。

2 多波段光谱仪光学系统原理

多波段光谱仪的光学系统主要由入射狭缝、场镜、准直镜、光栅、成像镜、滤光片和 CCD 组成,是“W

收稿日期: 2012-07-12; 收到修改稿日期: 2012-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(11103075)和西部之光资助课题。

作者简介: 付 玉(1983—),女,硕士,助理研究员,主要从事光学仪器设计、安装调试等方面的工作。

E-mail: fiona@ynao.ac.cn

型”光栅光谱仪,多波段光谱仪的准直镜与成像镜的焦距均为 6 m,视场为 3',由吊篮式光谱筒的中平台承载。目前,光谱仪的波长分别是 H α 656.3 nm, Ca II 854.2 nm, He I 1083 nm,使用刻线密度为 1200 line/mm 的闪耀光栅(闪耀角为 36.8°,闪耀波长为 1 μ m,一级衍射)。本文模拟了光谱仪的光路,如图 1 所示,给出了狭缝、场镜、光栅和准直镜的位置。另外,3 个成像镜(编号 1、2、3)依次对 H α 656.3 nm、Ca II 854.2 nm、He I 1083 nm 波段成像,同时给出了光谱仪设计的理论位置参数,如表 1 所示,以狭缝位置为坐标原点。

表 1 光学元件理论位置参数(单位:mm)

Table 1 Theoretical position parameters of the optical element (unit: mm)

| Optical element | X ₀ | Y ₀ | Z ₀ | Focal |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| Silt | 0 | 0 | 0 | — |
| Field mirror | 0 | 0 | -25 | — |
| Collimating lens | 0 | 0 | -6002 | 6002 |
| H α imaging lens | 1913.59 | 0 | -5837.79 | 5987.5 |
| CaII imaging lens | 514.13 | 0 | -6145.62 | 6000.5 |
| He I imaging lens | -1445.35 | 0 | -5903.52 | 6005 |
| Grating | 163.16 | 0 | -504.42 | — |



图 1 光路图
Fig. 1 Optical layout

3 装调误差分析

光谱仪成像系统的像差主要有轴上像差和轴外像差,轴上像差为球差,使衍射像的能量扩散;轴外像差对成像质量影响也很大,在装配不佳时,可能造

成衍射像的畸变^[5,6]。由于光机零件在加工的过程中必然会存在一定的误差,这种偏差会导致光学零件的理论位置与实际的安装位置有差异。利用光线追迹的方法,以波前均方根(RMS)值作为像质评价标准,对各个元件安装误差进行分析,在系统达到衍射极限的情况下,给出了误差分析结果,如表 2 所示。

表 2 误差分析结果

Table 2 Result of error analysis

| Optical element | Type of error | | | |
|------------------|---------------|-----------------|-------------|--------------|
| | Tilt (x, y) | Decenter (x, y) | Defocus (z) | Rotation (z) |
| Slit | 0.5° | 2 mm | ±10 mm | 10'' |
| Collimating lens | <5' | 10 mm | ±10 mm | — |
| Grating | (4', 3') | 5 mm | — | 10'' |
| Imaging lens | <5' | 10 mm | ±10 mm | — |

4 装调方案

从上述分析结果可以看出,光栅的安装精度要求高于其他光学元件。以各个光学器件的误差分析结果作为依据,结合实际光学系统的结构特性,针对具体的光学元件确定了多波段光谱仪光学系统安装调试的思路:利用合理的变动来纠正或补偿元件加工、装配或材料缺陷造成的成像误差^[7,8]。

4.1 狭 缝

狭缝的位置是望远镜的焦平面也是光谱仪的物面、光谱仪准直镜的焦面和光谱仪旋转轴的中心所经过的平面,所以对于狭缝离焦问题与准直镜安装同时分析^[9]。假设前端望远镜系统是理想的情况,当狭缝倾斜 0.5°时,光谱仪系统会存在部分彗差,如图 2 所示,像场会出现明暗不均匀,通过调整准直镜的倾斜角度可以进行微小的校正,但是为了不影响整体的成像质量,需要将狭缝的倾斜安装精度控制在 0.5°以内。

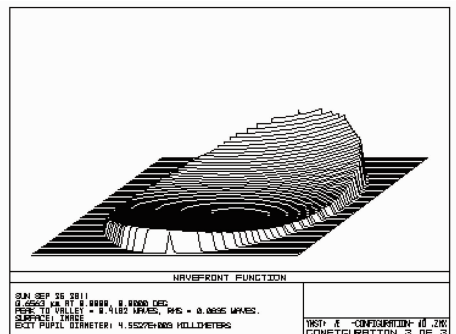
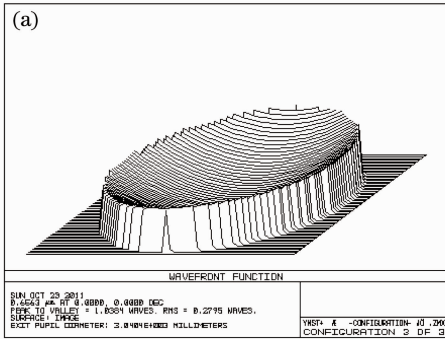


图 2 彗差图
Fig. 2 Coma

4.2 准直镜

利用 Zemax 软件模拟了准直镜离焦 ± 10 mm 时系统的成像情况,从图 3(a)可以看到系统中存在球差和离焦,经过移动 CCD 进行调焦补偿,消除了



离焦像差,如图 3(b)所示,虽然仍然存在一些像散,但是可以微调准直镜来消除。这样的模拟实验对于安装调试方案的设计有着重要的作用,也将大大缩短了光谱仪中平台上的操作时间。

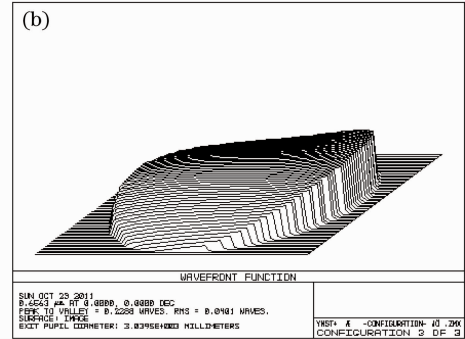


图 3 波前图。(a)准直镜离焦 10 mm;(b) CCD 调焦补偿 10 mm

Fig. 3 Wavefront. (a) 10 mm defocus of collimating mirror; (b) 10 mm defocus compensation of adjusting CCD

4.3 光栅

光栅在光学系统的光路中是承接准直镜与成像镜的重要光学元件。所以在安装的过程中既要考虑准直镜,光栅和成像镜的机械位置的对应关系,也要考虑分光栅的分光平面与各个成像镜和准直镜的光轴在同一工作面上,这对光栅的倾斜姿态调整精度要求很高。经过软件模拟做定量分析,光栅与狭缝的夹角为 5.7° 时,最终观测的谱线倾斜 4.9° 。根据 CCD 的像元尺寸便可知当谱线的偏差小于 0.05 mm 时,谱线的倾斜小于 1 pixel。

4.4 成像镜

成像镜同准直镜一样是大曲率的球面镜,当光轴与反射光的夹角越大,系统的球差越大,所以从像差的角度考虑,对成像镜倾斜的控制要相对严格,成像镜误差分析的方法与准直镜类似,成像镜的倾斜误差控制在角秒量级。

5 观测结果

根据误差分析结果,对光谱仪各个光学元件进行依次安装,先将准直镜与各面成像镜安装到光谱仪中平台的理论位置,并利用高度尺再次确认各个镜面中心到中平台的距离及水平距离,以保证准直镜到狭缝中心的距离及三个成像镜到 CCD 的距离在可调整范围内^[10,11],并做调整。下面给出观测的 656.3 nm 的谱线(如图 4 所示),及有改变光栅的入射角,观测得到 649.7 nm 谱线有黑子情况,如图 5 所示,两组数据做过平场处理,可以开展对太阳光谱的研究。

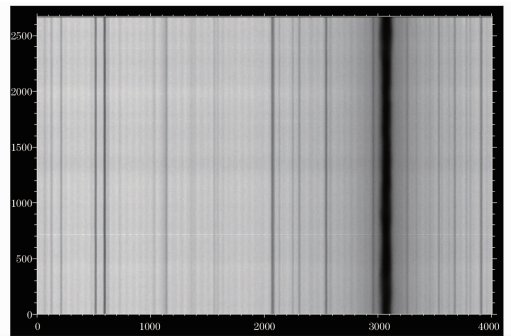


图 4 656.3 nm 波段光谱

Fig. 4 Spectrum of 656.3 nm

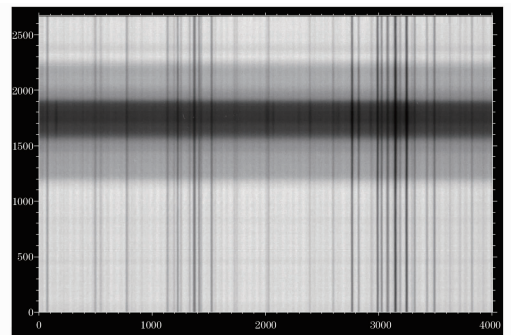


图 5 649.7 nm 波段光谱

Fig. 5 Spectrum of 656.3 nm

6 结 论

本文针对多波段红外太阳光谱仪的基线长、垂直吊篮式等特点,提出了非传统的方法进行安装调试。采用 Zemax 软件对系统进行误差分析,观测实验结果表明,该装调误差分析方法给定的狭缝倾斜小于 0.5° ,狭缝自旋小于 $10''$,准直镜的离焦小于 10 mm 是合理的。研究分析表明,这种模拟方法有

利于应对恶劣环境给仪器现场装调工作带来的麻烦,研究工作对于一米红外太阳塔大色散光谱的安装调试工作是一种重要参考。

参 考 文 献

- 1 Liu Zhong, You Jianqi, Shen Longxiang. One meter infrared solar telescope [C]. *Corpus of the Conference about Chinese Astronomical Telescope and Instrument*, 2002. 272~276
刘 忠, 尤建圻, 沈龙翔. 一米红外太阳望远镜[C]. 2002年中国天文望远镜及仪器研讨会会议文集, 2002. 272~276
- 2 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1516~1521
薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1516~1521
- 3 Wu Xuhua, Zhu Yongtian, Wang Lei. Optical design of high resolution echelle spectrograph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **13**(5): 443~447
武旭华, 朱永田, 王 磊. 高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2003, **13**(5): 442~447
- 4 Li Nana, An Zhiyong, Cui Jicheng, Aligning and testing of optical system of echelle spectrography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 531~536
李娜娜, 安志勇, 崔继承. 中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装调试[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(3): 531~536
- 5 Wu Guoan. *The Spectrography Instrument Deign* [M]. Beijing: Science Press, 1978
吴国安. *光谱仪器设计* [M]. 北京: 科学出版社, 1978
- 6 Li Shun, Gong Yan. Error analysis and correction during

- measurement of tube-shaped super-smooth mirrors using long trace profiler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112001
李 顺, 巩 岩. 长程轮廓仪用于筒状超光滑表面测量的误差分析及校正[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112001
- 7 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Tolerance analysis for a static Fourier-transform infrared spectrometer based on multi-micro mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0607002
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 静态傅里叶变换红外光谱仪的公差分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0607002
- 8 S. G. Wang, D. Q. Su, Y. Q. Chu. Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25): 5155~5161
- 9 Liu Guanghong, Wu Gang, Ling Qing *et al.*. Modelling of Offner imaging spectrometers and aberration analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0322001
刘光宏, 吴 刚, 凌 青等. Offner 成像光谱仪建模及像差分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0322001
- 10 Huang Yuanshen, Ni Zhengji, Zhuang Songlin. Research of the concentric optical system of grating spectrometers [J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(6): 38~42
黄元申, 倪争技, 庄松林. 光栅成像光谱仪同心光学系统研究[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(6): 38~42
- 11 Cui Tiangang, Zhang Hongji, Ma Dongmei *et al.*. Improvements of surface profile measuring device for Wolter type-I mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412007
崔天刚, 张宏吉, 马冬梅等. Wolter I型反射镜面形检测装置的改进[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412007

栏目编辑: 韩 峰