

doi:10.3788/gzxb20144310.1022001

宽视场航空高光谱成像仪光学系统设计

陈伟, 郑玉权, 薛庆生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:宽视场大相对孔径航空高光谱成像仪已成为航空海洋水色遥感等领域的迫切需求,根据宽视场和大相对孔径的研究目标,采用离轴两镜消像散望远镜和改进型 Offner 光谱仪匹配的结构型式,设计了一个视场 40° 、相对孔径 1/2.2、工作波段 $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 的航空高光谱成像仪光学系统,在传统 Offner 光谱仪中插入同心弯月透镜来提高 Offner 光谱仪的相对孔径和成像质量.运用光学设计软件 ZEMAX 对高光谱成像仪光学系统进行了光线追迹和优化设计,并对设计结构进行了分析.结果表明:光学系统各个波长的光学传递函数在奈奎斯特频率 28 lp/mm 处均达到 0.67 以上,谱线弯曲和谱带弯曲均小于 6.5% 像元,便于光谱和辐射定标,完全满足设计指标要求,且体积小、重量轻,适合航空遥感应用.

关键词: 光学设计; 光学仪器; 光学系统; 光学望远镜; 光谱仪; 光谱分辨率; 高光谱成像仪

中图分类号: O433.1; TN744.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1022001-6

Optical System Design of Airborne Wide Field-of-view Hyperspectral Imager

CHEN Wei, ZHENG Yu-quan, XUE Qing-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 13033, China)

Abstract: Airborne ocean colour remote sensing urgently require wide angle and large relative-aperture hyperspectral imager. Based on the research objective of wide angle and large relative-aperture, an airborne hyperspectral imager optical system was designed using an off-axis two-mirror anastigmat telescope and a modified Offner spectrometer. The field of view of hyperspectral imager was 40° , relative-aperture was 1/2.2, and working waveband was from $0.4\ \mu\text{m}$ to $1\ \mu\text{m}$. Relative aperture and image quality were improved by inserting a concentric meniscus in a classical Offner spectrometer. Ray tracing, optimization and analysis were performed by ZEMAX software. The analyzed results demonstrate that the MTF for different wavelengths is more than 0.67 at Nyquist spatial frequency 28 lp/mm, both smile and keystone are less than 6.5% of the size of pixel. It is easy for spectral and radiation calibration. The design results satisfy the requirements of specifications, the volume is small, mass is low, and is suitable for airborne remote sensing.

Key words: Optical design; Optical instruments; Optical systems; Optical telescope; Spectrographs; Spectral resolution; Hyperspectral imager

OCIS Codes: 220.0220; 120.4820; 280.4788

0 引言

高光谱成像仪是 20 世纪 80 年代开始在多光谱遥感成像技术基础上发展起来的一种新型航空、航天光学遥感仪器,能同时获取目标的高光谱分辨率和高空

间分辨率的信息,在海洋、陆地和大气遥感等航空和航天领域得到越来越广泛的应用^[1-5].

目前国际上具有代表性的航空高光谱成像仪有美国的便携式海洋探测高光谱成像仪(PHILIS)^[6]和先进航空高光谱成像仪系统(AAHIS)^[7]等,PHILIS 的

基金项目:国家自然科学基金(No. 41105014)和中科院长春光机所领域前沿创新项目资助

第一作者:陈伟(1963-),女,工程师,学士,主要研究方向为光学设计、计算机管理. Email: xue_ciomp@163.com

通讯作者:薛庆生(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光学设计、航空航天遥感成像光谱技术及光谱辐射定标. Email: qshxue2006@163.com

收稿日期: 2014-01-27; **录用日期:** 2014-05-20

<http://www.photon.ac.cn>

相对孔径 1/4, 工作波段为可见近红外波段 400~1 000 nm, AAHIS 的相对孔径为 1/3, 工作波段为 390~840 nm, 视场为 20°, 这些高光谱成像仪在航空遥感中发挥了重要作用, 但缺点是视场覆盖宽度小, 相对孔径小、集光能量弱. 近年来, 随着航空遥感应用的不断深入发展, 对高光谱成像仪的视场宽度和相对孔径的要求也越来越高. 视场覆盖宽度越大, 回访周期越短, 仪器的时间分辨率就越高. 高光谱成像仪的像面照度与相对孔径的平方成正比, 相对孔径越大, 仪器的集光能力就越强, 信噪比就越高. 在海洋水色遥感等领域, 由于目标的反射率较低, 在保证光学系统光谱分辨率 5 nm、地面像元分辨率 5 m、信噪比大于 200 的条件下, 要求高光谱成像仪的相对孔径大于 1/3, 且视场覆盖宽度越大越好. 现有高光谱成像最大视场(如 AAHIS)仅为 20°, 不能满足遥感应用需求. 因此迫切需要解决现有高光谱成像仪光学系统视场覆盖范围较小、相对孔径和集光能力较弱的问题. 另外, 航空遥感应用还要求高光谱成像仪具有小型化和轻量化的特点, 因此, 宽视场大相对孔径航空高光谱成像仪成为研究目标.

高光谱成像仪光学系统由望远镜和光谱仪组成, 二者通过入射狭缝连接在一起^[8-9]. 目标的一个条带先经望远镜成像在入射狭缝上, 入射狭缝经光谱仪色散后分波长成像在面阵焦平面探测器上, 再经随平台运行方向推扫得到图谱合一的图像. 在高光谱成像仪的研制过程中, 光学系统的选择和设计直接影响着整个高光谱成像仪的性能、结构的复杂程度、重量和体积等.

本文根据宽视场大相对孔径的应用要求和技术指标, 采用两镜消像散望远镜和改进型 Offner 光谱仪匹配的结构型式设计了航空高光谱成像仪光学系统. 在传统 Offner 光谱仪中插入同心弯月透镜来提高 Offner 光谱仪的相对孔径和成像质量, 利用光学设计软件进行了优化设计, 并对设计结果进行了分析与评价.

1 应用要求及主要技术指标

航空高光谱成像仪的工作波段 0.4~1 μm, 主要进行海洋水色探测, 飞行轨道高度 $H=10$ km, 要求刈幅宽度 $GW \geq 7$ km, 地面像元分辨率 $GSD=5$ m, 光谱分辨率 ≤ 5 nm, 信噪比大于 200, 所采用 CCD 探测器的像元数为 $1\,500 \times 256$, 像元尺寸 p 为 $18 \mu\text{m}$. 根据以上要求, 确定高光谱成像仪光学系统的主要技术指标.

根据飞行高度 H 和地面像元分辨率 GSD 的要求, 确定成像光谱仪全系统的焦距 f_s' 为

$$f_s' = \frac{p \cdot H}{GSD} = 36 \text{ mm} \quad (1)$$

光谱成像系统的变倍比取 1/1, 则望远成像系统的焦

距 f_i' 亦为 36 mm. 根据飞行高度 H 和刈幅宽度的要求, 确定成像光谱仪的视场 FOV 为

$$\text{FOV} = 2 \arctan\left(\frac{GW}{2H}\right) = 38.58^\circ \quad (2)$$

这里留出余量, 取 FOV 为 40°. 根据海洋目标的光谱辐射特性和 CCD 探测器的性能参数, 确定成像光谱仪光学系统的相对孔径为 1/2.2. 高光谱成像仪光学系统的主要技术指标汇总如表 1.

表 1 成像光谱仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of imaging spectrometer optical system

Spectral range/ μm	0.4~1
Field of view (FOV) /($^\circ$)	40
Focal length of telescope f_i' /mm	36
Focal length of system f_s' /mm	36
Relative aperture	1/2.2
Entrance diameter/mm	16.4
Detector array size/pixel	1 500 × 256
Detector pixel size / μm	18 × 18
MTF	$\geq 0.5 @ 28 \text{ lp/mm}$
Spectral resolution/nm	≤ 5

2 两镜消像散望远镜设计

从技术指标可以看出, 望远镜是一个宽视场(40°)、大相对孔径(1/2.2)、宽波段(400~1 000 nm)的光学系统, 要求高成像质量. 反射系统与折射系统相比, 可以避免色差, 不会对光谱成像系统的谱带弯曲(Keystone)造成影响. 两镜消像散结构可以获得大相对孔径^[10], 它可以看作是一个倒置的 Cassegrain 结构, Rosin 对同轴两镜消像散结构进行了研究, 但同轴两镜消像散结构存在较大的遮拦, 这限制了它的应用.

在综合权衡各种望远镜光学方案的基础上, 选择全反射离轴两镜消像散结构作为望远镜的结构型式(如图 1), 它由一个离轴非球面主镜和一个离轴非球面次镜组成, 主镜为凸二次曲面, 次镜为凹二次曲面, 为了与光谱仪实现光瞳匹配, 要求望远镜像方远心. 图 2 为两镜消像散望远镜系统的光学传递函数曲线, 可以看出各视场在 Nyquist 频率 28 lp/mm 处的光学传递函数大于 0.91.

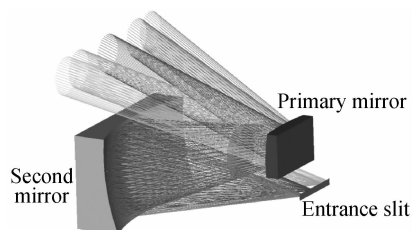


图 1 两镜消像散望远镜光学结构

Fig. 1 Optical path of two-mirror anastigmatic telescope

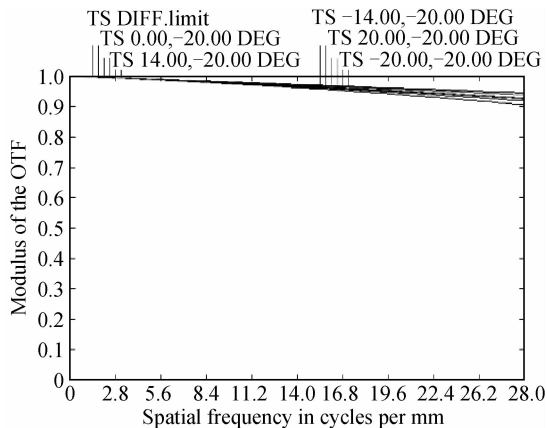


图2 两镜消像散望远镜光学传递函数曲线

Fig. 2 MTF of two-mirror anastigmatic telescope parameters

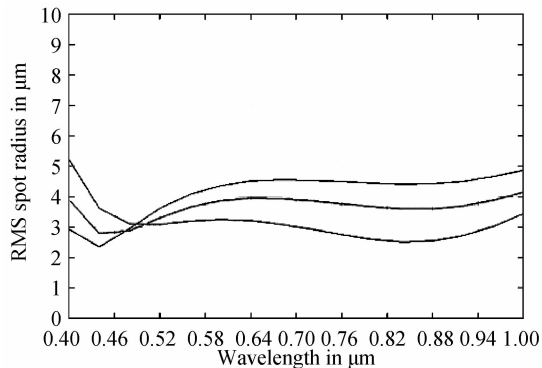


图4 改进型 Offner 光谱仪点列图半径的 RMS 值随波长的变化关系曲线

Fig. 4 RMS spot radius VS wavelength of modified Offner spectrometer

3 改进型 Offner 光谱仪设计

从技术指标可以看出,光谱仪是一个大相对孔径、宽波段光谱成像系统,光谱分辨率高.以凸面光栅作为色散元件的 Offner 光谱仪具有成像质量高、体积小、重量轻的优点,因此在高光谱成像仪系统中得到广泛应用^[11-12].但传统的 Offner 光谱仪的相对孔径一般为 1/4 左右,随着相对孔径的增大,为了避免遮拦,狭缝的离轴入射高度需要相应增大,因此,像差也相应增大,成像质量降低^[13].本文光谱仪的相对孔径要求 1/2. 2,传统的 Offner 光谱仪不能满足成像要求,因此,对其进行了改进.改进型 Offner 光谱仪在传统的 Offner 光谱仪的凸面光栅附近插入一个同心弯月透镜,用来校正由于相对孔径增大引起的像差.

图 3 为改进型 Offner 光谱仪的光学结构图.图 4 为改进型 Offner 光谱仪像面上点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线.从图 4 可以看出,在整个工作波段内,点列图半径的均方根值均小于 5.2 μm,小于探测器像元尺寸的一半(9 μm),这表明改进型 Offner 光谱仪在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量.为了作为比较,图 5 为传统的 Offner 光谱仪光学结构图,图 6 给出了传统的 Offner 光谱仪点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线.

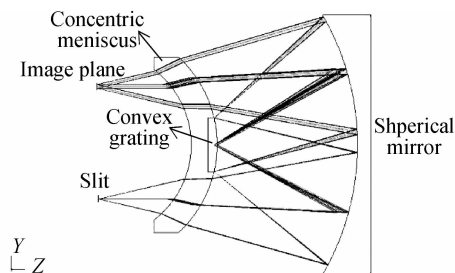


图3 改进型 Offner 光谱仪光学结构

Fig. 3 Optical path of modified Offner spectrometer

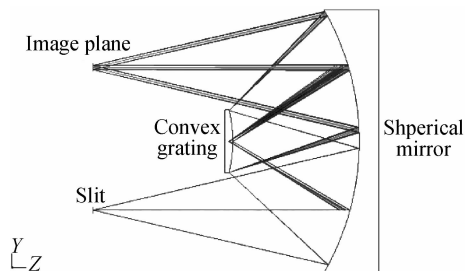


图5 传统的 Offner 光谱仪光学结构

Fig. 5 Optical path of classical Offner spectrometer

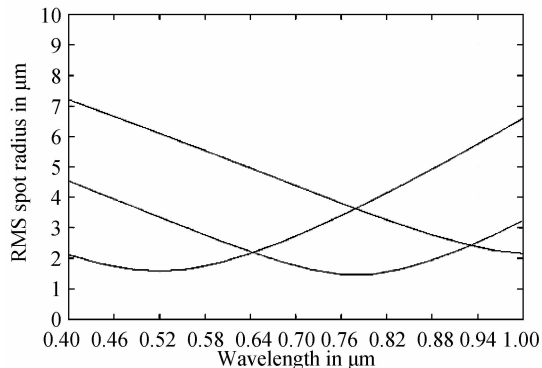


图6 传统的 Offner 光谱仪点列图半径的 RMS 值随波长的变化关系曲线

Fig. 6 RMS spot radius VS wavelength of classical Offner spectrometer

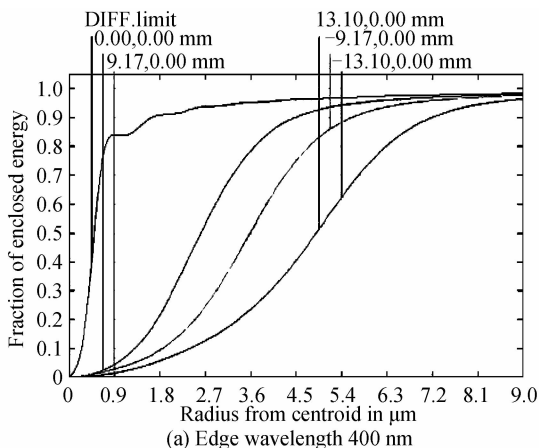
从图 6 可以看出,传统 Offner 光谱仪点列图半径的均方根值随波长变化较大,最大值达到 14.5 μm,大于探测器像元尺寸的一半(9 μm),不能满足成像质量要求.而改进型 Offner 光谱仪点列图半径的均方根值仅为 5.2 μm,成像质量明显提高,表明本文提出的 Offner 光谱仪的改进方法是可行的.图 7 为改进型 Offner 光谱仪不同波长的能量集中度曲线,90% 以上的能量集中在一个像元以内,获得了良好的成像质量,0.4~1.0 μm 波段内工作波段内的光在改进型 Offner 光谱仪像面上的色散宽度为 4.5 mm,线色散率的倒数 $d\lambda/dl$ 为

$$d\lambda/dl = 133.33 \text{ nm/mm} \quad (3)$$

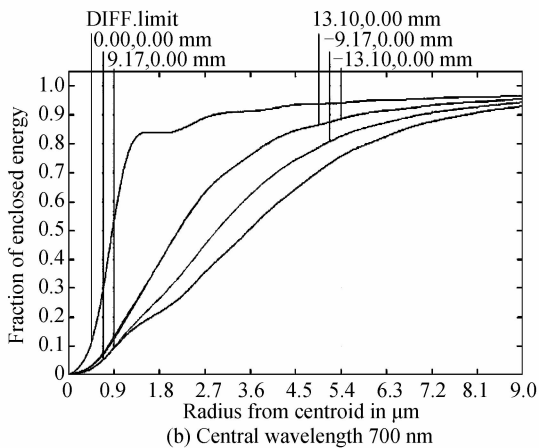
两个像元获得一个谱带,则光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = d\lambda/dl \cdot (2p) = 4.8 \text{ nm/mm} \quad (4)$$

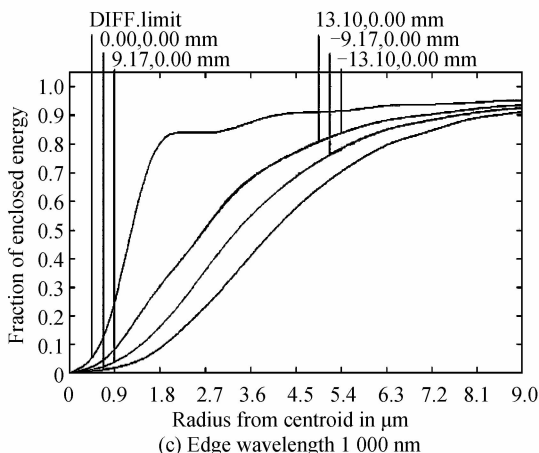
式中, $p = 18 \mu\text{m}$, 为探测器的像元尺寸. 光谱分辨率为 4.8 nm , 满足光谱分辨率 $\leq 5 \text{ nm}$ 的指标要求.



(a) Edge wavelength 400 nm



(b) Central wavelength 700 nm



(c) Edge wavelength 1 000 nm

图7 改进型 Offner 光谱仪不同波长的能量集中度曲线
Fig. 7 Encircled energy of modified Offner spectrometer

光谱仪的畸变可以用谱线弯曲 (Smile) 和谱带弯曲 (Keystone) 来表示^[14-15]. 谱线弯曲是指不同波长的狭缝弯曲图像与直线的偏离程度; 谱带弯曲为入射狭缝上的同一视场点所成的不同波长的像点与垂直于狭缝的直线的偏离程度. 图 8 为不同波长的谱线弯曲. 图 9 为不同波长的谱带弯曲.

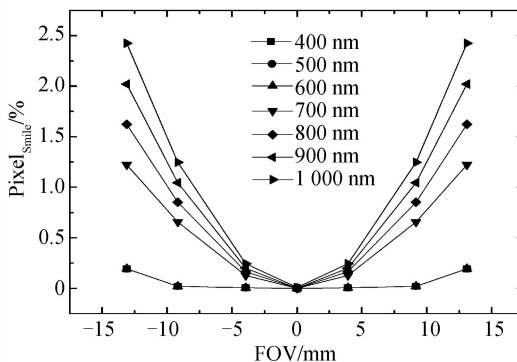


图8 改进型 Offner 光谱仪不同波长的谱线弯曲
Fig. 8 Total smiles of modified spectrometer for central and edge wavelengths

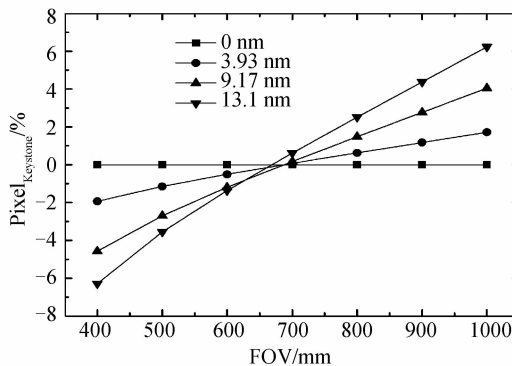


图9 改进型 Offner 光谱仪不同视场的谱带弯曲
Fig. 9 Keystone of modified Offner spectrometer for different field of view

由图 8 可知, 谱线弯曲关于中心视场对称, 随着波长的增加, 谱线弯曲量也增加, 最大谱线弯曲量仅为一个像元尺寸的 2.4%. 由图 9 可知, 随着视场的增大, 谱带弯曲量也增大, 最大谱带弯曲量小于一个像元尺寸的 6.2%, 在光谱和辐射定时可忽略.

4 高光谱成像仪全系统设计

将所设计的两镜消像散望远镜和改进型 Offner 光谱仪连接, 得到宽视场航空高光谱成像仪全系统的光学结构, 如图 10 所示, 体积仅为 $300 \text{ mm} \times 210 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$, 具有小型化和轻量化的特点, 特别适合航空遥感应用. 高光谱成像仪的空间分辨率由高光谱成像仪全系统的性能决定, 高光谱成像仪全系统不同波长如图 11. 从图 11 可以看出, 全系统不同波长的光学传递函数均达到 0.67 以上,

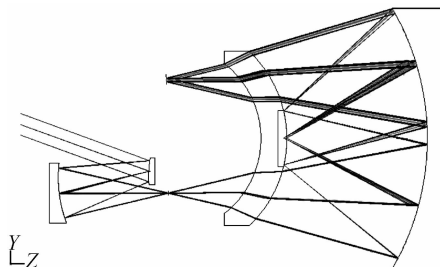
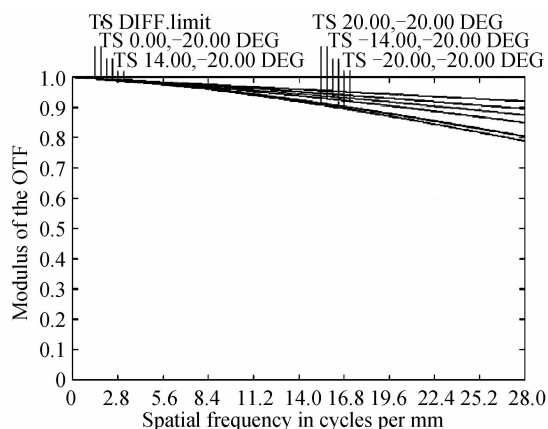
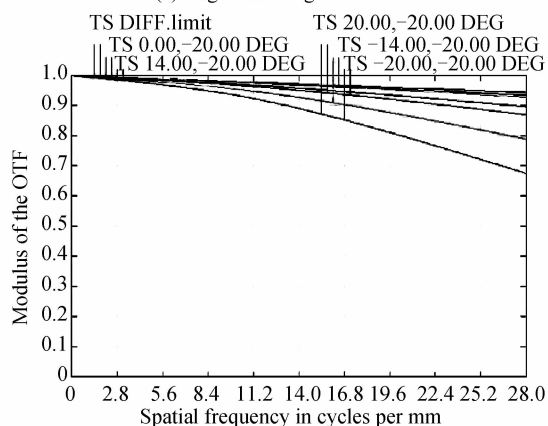


图10 高光谱成像仪全系统光学结构
Fig. 10 Optical construction for hyperspectral imager

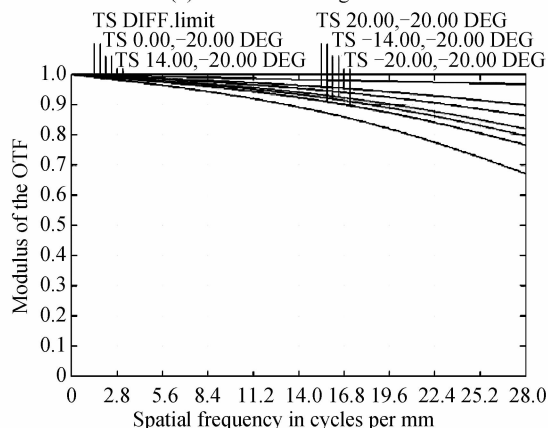
高于 $MTF > 0.5 @ 28 \text{ lp/mm}$ 的指标要求,可满足航空海洋遥感的需求。



(a) Edge wavelength 1000 nm



(b) Central wavelength 700 nm



(c) Edge wavelength 400 nm

图 11 高光谱成像仪全系统不同波长的光学传递函数

Fig. 11 MTF of hyperspectral imager for different wavelengths

5 公差分析

高光谱成像仪采用模块化研制的方案,望远镜和光谱仪先各自独立装调,然后再将二者连接在一起,因此分别对望远镜和光谱仪进行公差分析。望远镜的公差列表如表 2。光谱仪的公差列表如表 3。考虑上述公差后,望远镜的光学传递函数大于 $0.75 @ 28 \text{ lp/mm}$,光谱仪 80% 的能量集中在一个像元内,谱线弯曲小于 3.5% 个像元,谱

带弯曲小于 7% 个像元,成像质量满足要求,公差分配合理可行。

表 2 望远镜公差

Table 2 Tolerances of telescope

Parameter	Value
x -decenter/mm	± 0.02
x -decenter/mm	± 0.02
x -tilt / ($^\circ$)	0.01
y -tilt / ($^\circ$)	0.01
Distance tolerances/mm	± 0.02
Radius tolerances/mm	± 0.5
Irregularity tolerances/fringe(PV)	± 1

表 3 光谱仪公差

Table 3 Tolerances of spectrometer

Parameter	Value
x -decenter/mm	± 0.025
x -decenter/mm	± 0.025
x -tilt / ($^\circ$)	0.01
y -tilt / ($^\circ$)	0.01
Distance tolerances/mm	± 0.025
Radius tolerances/mm	± 0.3
Irregularity tolerances/fringe(PV)	± 1

6 结论

根据宽视场大相对孔径高光谱成像仪的要求,采用两镜消像散望远镜和改进型 Offner 光谱仪匹配的结构型式,设计了一个视场为 40° 、相对孔径 $1/2.2$ 、工作波段为 $0.4 \sim 1 \mu\text{m}$ 、光谱分辨率为 5 nm 的高光谱成像仪光学系统。使用光学设计软件 ZEMAX 进行了优化设计,并对设计结果进行了分析,分析结果表明,各波长的光学传递函数均达到 0.67 以上,满足成像质量要求,谱线弯曲和谱带弯曲均小于像元尺寸的 6.5% ,便于光谱和辐射定标,并且结构紧凑,适合航空遥感应用。

参考文献

- [1] ZHENG Yu-qian, GAO Zhi-liang. Optical system design of CO_2 sounder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(12): 2645-2653.
郑玉权,高志良. CO_2 探测仪光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(12): 2645-2653.
- [2] CHEN Wei, XUE Chuang. Design of wide field-of-view three-mirror telescope for imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 950-955.
陈伟,薛闯. 用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(8): 950-955.
- [3] WANG Yi-qun, YAN Chang-xiang, JIA Ping. Motion precision measurement of imaging spectrometer's scanning mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 185-189.
汪逸群,颜昌翔,贾平. 成像光谱仪扫描镜运动准确度测量[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 185-189.
- [4] ZHANG Jun-qiang, WU Qing-wen, YAN Chang-xiang. Stray light measurement of space-borne high resolution imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1319-1323.
张军强,吴清文,颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光测量[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1319-1323.

- [5] XUE Qing-sheng. Design and study of limb sounder of atmospheric trace gas for spaceborne remote sensing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3):271-277.
薛庆生. 空间遥感大气痕量气体临边探测仪设计与研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(3):271-277.
- [6] TOPPING M Q, PFEIFFER J E, SPARKS A W, *et al.* Advanced airborne hyperspectral imaging system [C]. SPIE, 2002, **4816**:1-11.
- [7] DAVIS C O, BOWLES B, ROBERT A, *et al.* Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration [J]. *Optics Express*, 2002, **10**(4):210-221.
- [8] PEARLMAN J, SEGAL C, LUSHALAN L, *et al.* Development and operations of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer [C]. SPIE, 2004, **4135**:243-253.
- [9] LIU Zhuang, GONG Yang. Design and analysis of optical system for solar extreme-ultraviolet imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7):776-780.
刘壮, 巩岩. 太阳极紫外成像光谱仪光学系统设计与分析 [J]. 光子学报, 2012, **41**(7):776-780.
- [10] ROSIN S. Inverse Cassegrainian systems [J]. *Applied Optics*, 1968, **7**(8):1483-1497.
- [11] CUI Ji-cheng, LIU Yu-juan, PAN Ming-zhong, *et al.* The integrative design for imaging spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(3):839-843.
崔继承, 刘玉娟, 潘明忠, 等. 成像光谱仪一体化设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(3):839-843.
- [12] ZHENG Yu-quan, WANG Hui, WANG Yi-fan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(11):2629-2637.
郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计 [J]. 光学精密工程, 2009, **17**(11):2629-2637.
- [13] ZHENG Yu-quan. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(6):650-657.
郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2005, **13**(6):650-657.
- [14] QINGSHENG X. Modified Schwarzschild imaging spectrometer with a low F-number and a long slit [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(28):6956-6961.
- [15] QIAN Lu-lu, XIANG-LI Bin, LÜ Qun-bo, *et al.* Analysis and simulation of effect of spectral line bending on computational imaging spectrometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8):897-901.
钱璐璐, 相里斌, 吕群波. 谱线弯曲对计算光谱成像影响的分析与仿真 [J]. 光子学报, 2013, **42**(8):897-901.