

紧凑型红外成像光谱仪光学设计

袁立银, 谢佳楠, 侯佳, 吕刚, 何志平

(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 为降低成像光谱仪对工作平台体积质量的需求, 优化光路布局, 提高系统的热适应性, 阐述了一种紧凑型红外成像光谱仪的光学系统设计。考虑结构尺寸和像差平衡, 光学设计中引入了扩展多项式面型。系统光谱范围为 1~3.4 μm , F /数为 2.86, 光谱采样间隔为 7.5 nm。光学系统由一个自由曲面三反射镜望远镜和一个基于平面光栅的自由曲面光谱仪组成。望远镜准远心设计, 与后方远心光谱仪光瞳匹配, 无畸变且像方空间便于其他结构模块布局。光谱仪像质优良, 光谱畸变校正良好, 像面倾斜得到改善便于探测器布局。从光栅衍射效率设计、杂散光抑制和光机一体化集成镜件设计三方面对该系统作了分析, 结果表明系统具有工程可行性。

关键词: 光学设计; 成像光谱仪; 扩展多项式; 光机集成镜件

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0418001

Optical design of compact infrared imaging spectrometer

Yuan Liyin, Xie Jianan, Hou Jia, Lv Gang, He Zhiping

(Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: To reduce the burden of the working platform, optimize the optical structure and promote the thermal adaption of the imaging spectrometer, an optical design of a compact infrared imaging spectrometer was presented. Due to compactness and aberration correction, the extended polynomial surfaces were utilized in the optical design of the infrared imaging spectrometer with spectral region between 1 μm to 3.4 μm , optical speed of $F/2.86$, and spectral sampling of 7.5 nm. The optical system was comprised of a free form three mirror telescope and a plane grating based free form spectrometer. The telescope was semi telecentric for pupil matching with the telecentric spectrometer, free of distortion and able to provide enough imaging space for other modules. The good imaging quality of spectrometer, and spectral distortion correction were achieved, and the tilt of image plane for detector arrangement was improved. The system is analyzed from the diffraction efficiency of the grating, the suppressed stray light, as well as the opto-mechanical design of the integrated mirrors, which show it has high engineering feasibility.

Key words: optical design; imaging spectrometer; extended polynomial; opto-mechanical integrated mirror

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2017-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(21105109)

作者简介: 袁立银(1981-), 女, 研究员, 博士, 主要从事空间光学与光谱成像技术方面的研究。Email: yuanliyin@mail.sitp.ac.com

通讯作者: 何志平(1977-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间光学与光谱探测技术方面的研究。Email: hzping@mail.sitp.ac.com

0 引言

光谱成像仪器在光谱分析和物质识别方面能力强大。随着焦平面探测器技术的发展,推帚式成像光谱仪能以图片形式获取探测目标的光谱。这种仪器广泛应用于遥感领域,并且在深空探测,如月球、火星和其他行星探测中发挥着重要作用。例如,欧空局ESA的紧凑勘测成像光谱仪(Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer, CRISM)^[1],美国JPL实验室为印度研制的Moon Mineralogy Mapper(M3)月球矿物分析仪^[2]以及我国嫦娥三号红外光谱仪^[3]等等。通常,深空探测领域应用的此类系统对仪器体积、质量以及环境适应能力都有苛刻的要求,因此,这类系统的光学设计要求也比较高。

文中介绍了一种紧凑型红外成像光谱仪光学系统,光谱覆盖 1~3.4 μm, *F*数为 2.86,光谱采样间隔为 7.5 nm。该系统结构简单、轻小紧凑,对飞行平台资源需求低,适用于平台资源有限的深空探测与行星探测领域。

1 光学相关指标及系统选型

1.1 光学相关指标要求

仪器与光学系统相关的指标要求列于表 1 中。

表 1 光学相关指标

Tab.1 Specifications related with optical system

Parameters	Values
Scan type	Push-broom
Spectral range/μm	1.0~3.4
<i>F</i> /number	2.86
Cross track FOV/(°)	12
Spectrometer magnification	-0.812 5×
FPA pixels	512×320
FPA pixel size	25 μm square

焦平面探测器空间维和光谱维的像元数分别为 512 像元和 320 像元,其中光学系统穿轨视场空间维 416 像元(N_1),剩余 96 像元(N_2)用于辐射定标。

望远镜的焦距可从公式(1)求解出

$$\frac{N_1 \cdot p}{2\beta} = f_T \cdot \tan \omega \quad (1)$$

式中: N_1 、 p 、 β 、 f_T 和 ω 分别为全视场空间维使用像元数、探测器像元尺寸、光谱仪放大倍率、望远镜焦距和系统半视场角,因此望远镜的焦距 f_T 为 60.9 mm。系统瞬时视场为 0.505 mrad。

1.2 光学系统选型

考虑光学系统的环境适应性和宽波段要求,光学系统采用全反射望远镜和基于平面光栅的光谱仪结构。光学系统如图 1 所示,系统结构简单,利于定标模块和焦平面探测器布局。

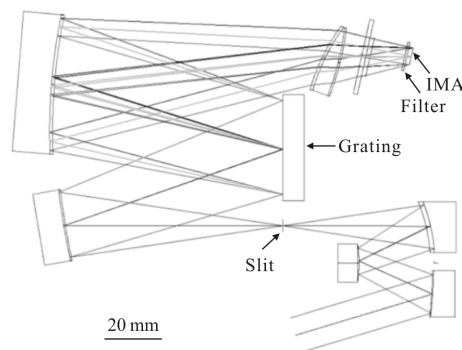


图 1 光学系统图

Fig.1 Completed optical system

2 光学系统设计

2.1 望远镜

根据系统 *F*数和光谱仪放大倍率,则望远镜视场为 12°, *F*数为 3.52,实际 *F*数略小于此数,为 3.3。望远镜结构原型为离轴三反射式系统(TMA),该系统的初始解求解在诸多文献中已经详细介绍过^[4-5],文中不再赘述。通常,这种 TMA 结构很难兼顾消畸变和像方(准)远心设计,同时畸变校正也会缩短三镜到像方的工作距离,不利于其他结构模块和光谱仪的排布。为解决这个问题,在望远镜设计中引入扩展多项式面型,增加设计变量。孔径光阑置于次镜上。

望远镜设计结果表明:主镜为偶次非球面,次镜和三镜均为 27 项扩展多项式。图 2 为望远镜的半视场点列图,另一对称半视场光斑大小与其相同,全视场光斑均方根(rms)在 2 μm 以内,设计接近衍射极限。全视场最大畸变小于 0.2 μm。出瞳在像面约 1 000 mm,对于短焦距小尺寸的望远镜,基本可认为是远心,与后方远心光谱仪对接后,对系统像差和镜面通光口

径影响极小。

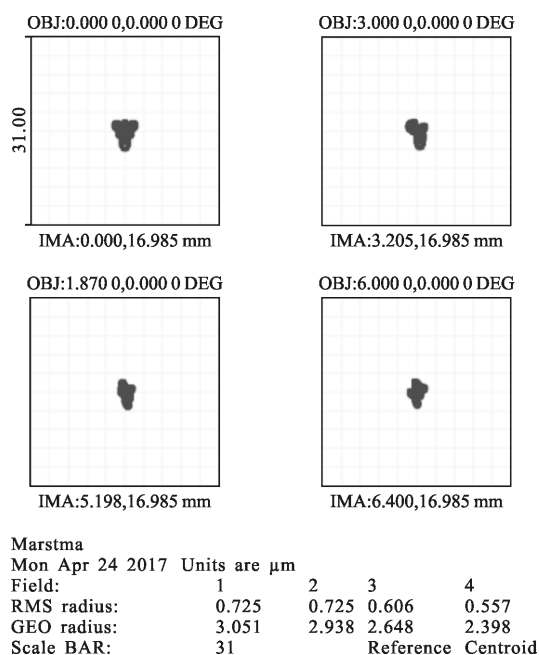


图 2 望远镜点列图

Fig.2 Spot diagram of the telescope

2.2 光谱仪设计

光谱仪结构原型为 Czerny-Turner 分光结构,光学设计中引进了自由曲面设计^[6]。为增大线视场、平衡像差,将两片同轴球面镜面型替换为扩展多项式面型;兼顾光谱畸变并将像面调整到次镜后方适当距离,减小像面倾斜便于制冷型焦平面探测器布局,在像面前加入一块校正透镜,该透镜公差宽松。

光谱仪的设计指标与性能列于表 2 中。

表 2 光谱仪指标与性能

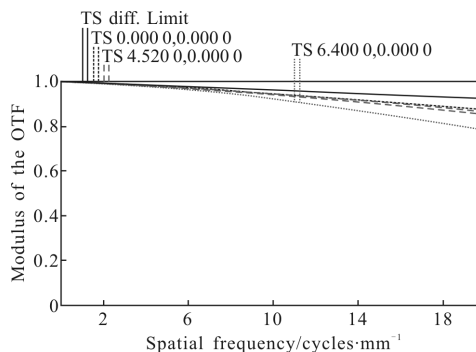
Tab.2 Specifications of the spectrometer

Parameters	Values
Spectral range/ μm	1.0-3.4
Spectrometer magnification	-0.812 5 \times
Objective NA	0.143
Spectral sampling/nm	7.5
Slit dimension	12.8 mm \times 31 μm
Entrance pupil position	OBJ telecentric
Smile and keystone/pixel	1/3

根据探测器尺寸和光谱仪放大倍率,可得狭缝

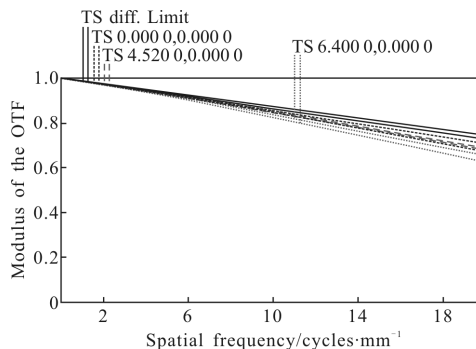
缝宽为 30.76 μm ,实际使用 31 μm 缝宽。

两端波长对应的传递函数 MTF 如图 3 所示,1 μm 处全视场 MTF 高于 0.78,3.4 μm 处全视场 MTF 高于 0.62。光谱畸变 smile 和 keystone 如图 4 所示,最大 smile 在边缘波长 1 μm 处,为 3.5 μm ,约为 0.140 像元;最大 keystone 在边缘视场上,绝对值为 7.9 μm ,约为 0.316 像元。



(a) 起始波长 1 μm 处 MTF

(a) MTF at starting wavelength 1 μm

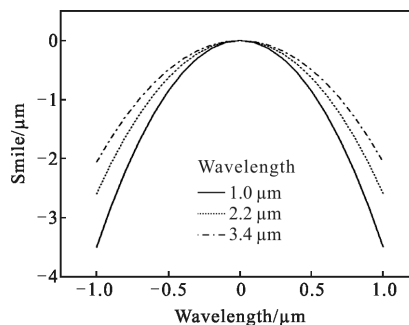


(b) 终端波长 3.4 μm 处 MTF

(b) MTF at ending wavelength 3.4 μm

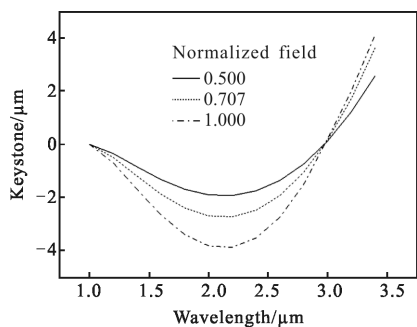
图 3 光谱仪 MTF

Fig.3 MTF of the spectrometer



(a) Smile 曲线

(a) Smile curve



(b) Keystone 曲线

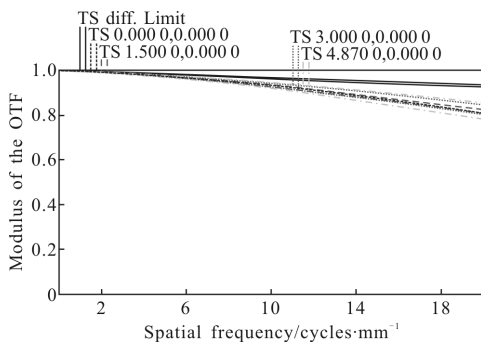
(b) Keystone curve

图 4 光谱仪光谱畸变

Fig.4 Smile and Keystone of the spectrometer

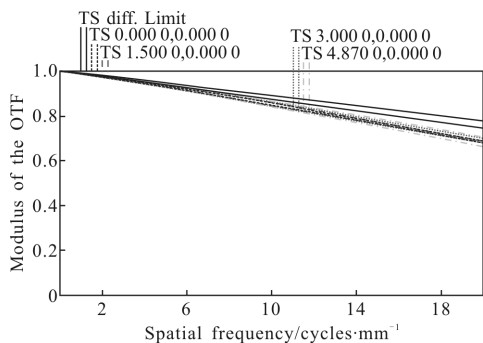
2.3 系统集成

成像光谱仪的光学设计是将其望远镜和光谱仪作为两个部分分别独立设计,有各自的优化目标,望远镜设计中控制像质、畸变和出瞳,光谱仪设计中控制入瞳、像质和光谱畸变。通常,若两个部分的 F /数和光瞳相互匹配,则在软件中将两部分对接即可完成系统集成,集成后的系统的像质变化不会太大,且光瞳位置也变化不大^[7]。该成像光谱仪系统集成后传递函数 MTF 如图 5 所示,1 μm 处全视场 MTF 高



(a) 系统起始波长 1 μm 处 MTF

(a) System MTF at starting wavelength 1 μm



(b) 系统终端波长 3.4 μm 处全视场 MTF

(b) System MTF at ending wavelength 3.4 μm

图 5 成像光谱仪 MTF

Fig.5 MTF of the imaging spectrometer

于 0.78, 3.4 μm 处全视场 MTF 高于 0.62。孔径光阑位置在次镜上,也在光栅上。

3 工程分析

3.1 光栅可行性

色散元件是成像光谱仪的关键元件,极大程度上决定了系统的光学系统结构选型和光谱性能。文中所述光谱仪的色散元件采用平面反射光栅,用自由曲面和校正透镜获得较大视场的良好像质以及光谱性能。光栅主要参数:使用光谱范围 1.0~3.4 μm 、使用级次 -1 级、刻线数 30 g/mm、通光口径 40 mm \times 36 mm(椭圆长轴 \times 短轴)。由于光谱覆盖范围宽,单闪耀光栅不能在全谱段获得较高的衍射效率。为解决此问题,采用空间对称分区的双闪耀光栅。衍射效率如图 6 所示,根据系统信噪比设计需求,设计时保证在偏长波段有较高的衍射效率,同时也兼顾起始波长有一定的衍射效率。

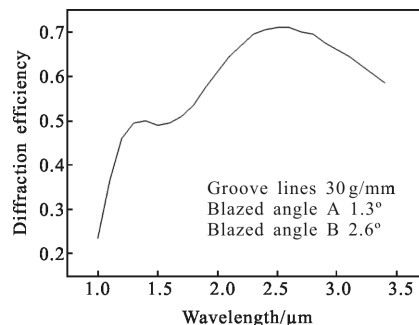


图 6 光栅衍射效率

Fig.6 Diffraction efficiency of the grating

平面反射闪耀光栅相对于同等参数的凸面或凹面闪耀光栅,其制造工艺相对较为成熟,性能更能保证。采用电子束刻蚀技术,可以得到设计的闪耀角度和面型^[7]。

3.2 杂散光抑制

成像光谱仪的杂散光主要来自于光谱仪本身的杂散光^[7]。该系统的杂散光主要来源:一是狭缝背面的反射,路径为狭缝到光栅,经光栅高级次衍射到狭缝,再通过其他路径到探测器;二是光栅非使用级次的衍射;三是探测器窗口、滤光片甚至芯片表面的多次反射。第一种,通过采用机械狭缝且在狭缝背面镀微结构和高吸收的发黑膜解决。第二种,采用级次分离滤光片阻止高级次的衍射光直接入射到探测器。

第三种,探测器窗口、级次分离滤光片与入射光线成一定倾斜角度,减轻多次反射造成的杂散光,滤光片和芯片的封装也要采取表面处理等措施消杂散光。

级次分离滤光片如图 7 所示,分为三个镀膜区域,通过前、后截止薄膜减轻二级和高级次的光栅衍射光影响。

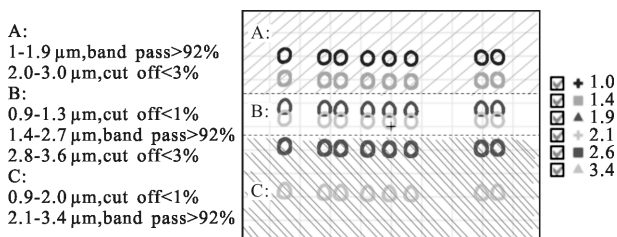


图 7 级次分离滤光片薄膜要求

Fig.7 Coating requirements of the order-sorting filter

3.3 光机集成镜件设计

文中光学设计,将色散元件的难度一定程度上分散到了其他光学元件的设计和制造上。

光学设计后期将自由曲面的光学中心经过坐标变换后移到了镜件加工的机械中心,使得光机一体化镜件形态设计更为合理,便于光学加工上盘;以及使得加工机床行程较短,光学加工精度更高。

考虑到环境适应性、整机结构布局和体积质量、以及光学制造和装调等因素,系统中的镜片采用光机集成式设计^[8],即光学材料与仪器内部的光学框架材料一致,光学镜片与镜座采用铝基一体化集成设计。如图 8 所示,背部轻量化设计,所有装配面通过单点车削技术保证 2 μm 以内的光学级共面度,经有限元分析可知装配应力对面形 rms 影响小于 $\lambda/40@632.8\text{ nm}$ 。为降低杂散光的影响,除光学面和凸耳安装面以外的所有面均进行发黑处理。

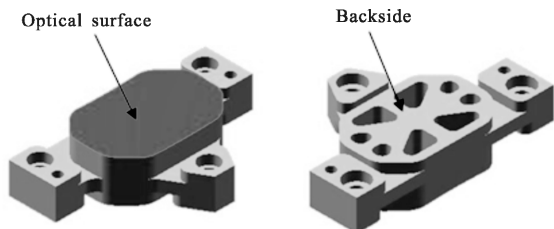


图 8 光机集成镜件设计

Fig.8 Design of the opto-mechanical integrated mirror

系统中包括自由曲面镜在内的所有反射镜均采用单点金刚石车削技术加工。通过优化设计光机集

成镜件,并优化加工流程,对于 50 mm 口径以内的自由曲面集成镜件,能实现 PV 值优于 0.3 μm、rms 优于 60 nm 的面型精度,可满足系统使用需求。

4 结论

设计了一套宽光谱红外成像光谱仪光学系统,光学结构采用自由曲面 TMA 望远镜和基于平面反射光栅的自由曲面光谱仪。望远镜设计像质优良、畸变可忽略不计且像方准远心,光谱仪设计像质优良、光谱畸变均小于 1/3 像元。两者光瞳匹配良好,系统设计性能满足仪器总体性能指标要求。对该系统的工程可行性进行了分析并提供了解决措施:采用平面反射双闪耀光栅使得全谱段能获得较高的衍射效率;采用多区域薄膜的级次分离滤光片解决光栅的非使用级次杂散光;采用光机集成铝基镜件设计提高系统的恶劣环境适应性,对金属反射镜做了特殊设计有利于光学镜件制造和系统装调。

该系统目前正在研制过程中,其基本性能已经得到了验证,包括成像性能和光谱性能,初步测试表明结果符合预期。该系统结构简单、体积紧凑、布局合理、性能优良,适用于深空探测和行星探测领域。文中的设计思想和方法可为此类系统的光学设计提供参考案例。

参考文献:

- [1] Murchie S, Arvidson R, Bedini P, et al. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 113(E05S03): 1-57.
- [2] Robert G, Carle P, Pantazis M, et al. The Moon Mineralogy Mapper (M3) imaging spectrometer for lunar science: instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(E00G19): 1-31.
- [3] He Zhiping, Wang Bingyong, Lv Gang, et al. Visible and near-infrared imaging spectrometer and its preliminary results from the Chang' E 3 project [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 083104.
- [4] Xue Qingsheng. Design of wide field of view off-axis three-mirror system for hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 942-946. (in Chinese)

- 薛庆生. 用于高光谱成像仪的大视场离轴三反系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 942-946.
- [5] Meng Qingyu, Wang Wei, Ji Zhenhua, et al. Design of off-axis three-mirror system based on integration of primary and tertiary mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 578-582. (in Chinese)
- 孟庆宇, 王维, 纪振华, 等. 主三镜一体化离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 578-582.
- [6] Hou Jia, He Zhiping, Shu Rong. Optical design of 400-1 000 nm spectral imaging system based on a single freeform mirror[C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9678: 96780L.
- [7] Pantazis M, Sellar R, Daniel W, et al. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(6): 063001.
- [8] Yuan Liyin, He Zhiping, Wang Yueming, et al. Manufacture, alignment and measurement for a reflective triplet optics in imaging spectrometer [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9684: 96840B.