

面向小行星探测的可见-红外光谱成像光学系统

杨福臻^{1,2}, 陈新华^{1,2*}, 赵知诚^{1,2}, 刘全^{1,2}, 沈为民^{1,2}

¹苏州大学光电科学与工程学院教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

²苏州大学光电科学与工程学院江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 设计了一种用于小行星探测的宽波段可见-红外 Offner 型光谱成像光学系统。该系统的工作波段覆盖 0.4~2.7 μm , 其可见-近红外(VNIR)通道(0.4~1.0 μm)和短波红外(SWIR)通道(1.0~2.7 μm)的 F 数分别为 6 和 3。通过求解及优化初始结构, 设计完成的光学系统点列图直径小于单个像元尺寸, 且在 Nyquist 频率处的调制传递函数(MTF)值不小于 0.51。为改善系统的光谱响应, 满足宽波段成像的需求, 系统中的凸面光栅被分成两个具有不同周期的区域, 分别工作在 VNIR 通道和 SWIR 通道。根据光学设计结果, 开展原理样机研制并进行性能测试。测试结果表明, 研制得到的光学系统成像质量良好, 满足设计指标要求。

关键词 光学设计; 空间探测; 光谱成像仪; 凸面光栅

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0722002

Visible-Infrared Imaging Spectrometer for the Exploration of Asteroids

Yang Fuzhen^{1,2}, Chen Xinhua^{1,2*}, Zhao Zhicheng^{1,2}, Liu Quan^{1,2}, Shen Weimin^{1,2}

¹Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Ministry of Education of China, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

²Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract In this study, we design an optical system for a visible-infrared (VNIR-SWIR) Offner imaging spectrometer for the space exploration of asteroids. The operation waveband of the proposed system covers from 0.4 μm to 2.7 μm , and the F number is 6 and 3 for the visible/near-infrared (VNIR) band (0.4~1.0 μm) and the short wave infrared (SWIR) band (1.0~2.7 μm), respectively. Subsequent to the initial structure development and optimization, spot diameters in the spot diagrams of the proposed optical system are observed to be less than one pixel, and the minimum modulation transfer function (MTF) is 0.51 at the Nyquist frequency. To improve the spectral response to fulfill the broadband spectral imaging requirement, the convex grating is divided into two regions with different grating periods. The inner region works in the VNIR band, while the other works in the SWIR band. The prototype of the imaging spectrometer optical system is developed and its spectral performance is characterized. Results show that the performance of the proposed prototype is satisfactory and can meet the requirements.

Key words optical design; space exploration; imaging spectrometer; blazed grating

OCIS codes 220.4830; 330.6100; 080.2740

1 引 言

小行星是 46 亿年前太阳系初期形成的行星体, 对其探测有助于人类了解宇宙起源, 揭示太阳系演化进程^[1]。小行星含有大量镍、铁和金等贵金属, 探测活动可为地球资源枯竭问题提供解决方案。此外, 通过探测小行星可以预测其运行轨迹, 提前预报

小行星撞击事件。综上所述, 小行星探测越来越受到关注, 已成为近期深空探测领域的热点。光谱成像仪可同时获得目标的空间和光谱信息, 已在矿物测绘、目标识别和气体监测等方面发挥重要作用。在小行星空间探测活动中, 光谱成像仪无疑是一个重要的光学载荷。

1996 年美国 NEAR 探测器发射升空, 光谱成

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2019-12-16; 录用日期: 2019-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500501-02)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

* E-mail: xinhua_chen@suda.edu.cn

像仪正式在小行星探测上崭露头角^[2]。搭载的 NIS (Near Infrared Spectrometer) 采用平面光栅分光, 工作波段为 $0.8 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 。其第一通道 ($1.5 \sim 2.7 \mu\text{m}$) 和第二通道 ($0.8 \sim 1.5 \mu\text{m}$) 的光谱分辨率分别为 44 nm 和 22 nm 。2007 年, 小行星带探测器黎明号 (Dawn) 发射升空。其搭载的光学载荷 VIRTIS-M (Visual IR Thermal Imaging Spectrometer-Mapping Channel), 同时覆盖 $0.4 \sim 1 \mu\text{m}$ 的可见波段和 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中波红外波段^[3], 光谱分辨率分别为 1.89 nm 和 9.44 nm 。2016 年, 美国 OSIRIS-Rex 任务搭载了滤光片型光谱仪^[4], 工作波段为 $0.4 \sim 4.3 \mu\text{m}$, 光谱分辨率小于 10 nm 。

本文首先分析对小行星矿物成分的探测需求, 确定光谱成像仪的主要参数; 然后计算分析宽波段可见-红外光谱成像光学系统的初始结构并进行优化, 并对所用分区凸面光栅的衍射效率进行了优化设计; 最后开展原理样机的研制并进行性

能测试。

2 系统指标要求

按小行星的光谱特性不同, 可将其分为 C、S 和 M 等类型^[5]。已知约 75% 的小行星属于 C 类, 其光谱特性与碳质球粒陨石的光谱特性相似, 碳质球粒陨石的主要成分是硅酸盐; S 类约占所有小行星的 17%, 主要成分为硅酸盐、铁和镁等; M 类小行星主要成分为镍-铁等金属, 被认为是铁陨石的来源。

从研究小行星矿物组成和光谱类型的应用需求出发分析光谱成像仪的指标要求。图 1(a) 是铝层状硅酸盐中的高岭石、埃洛石和蒙脱石在 VNIR-SWIR 波段的反射光谱, 图 1(b) 是图 1(a) 在 $1.30 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 波段的局部放大图。从图 1(b) 中可以看出, 在吸收峰处几种矿物的中心波长位置相差约 10 nm 。图 2(a) 是在不同地区的 HEDs 陨石在 $0.3 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 处的反射光谱图。HEDs 是 Howardite、

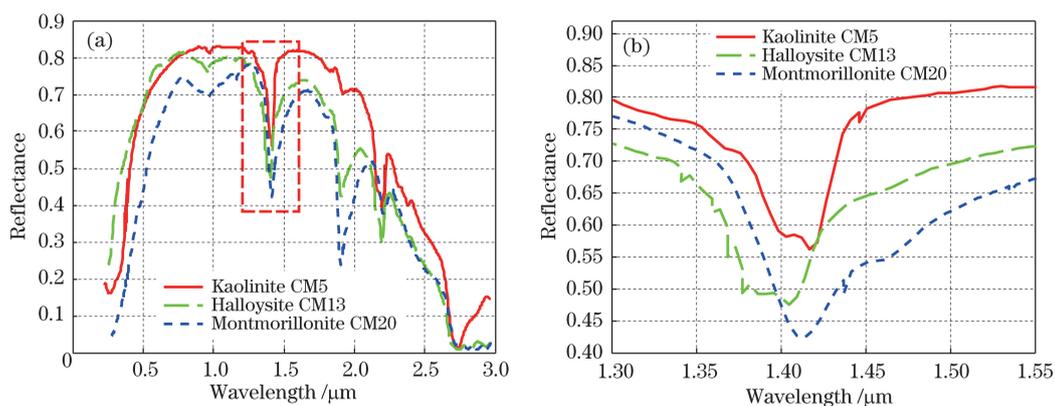


图 1 高岭石、埃洛石和蒙脱石的 VNIR-SWIR 波段反射光谱及局部放大图。(a) 典型光谱曲线; (b) 图 1(a) 中所选区域的局部放大图

Fig. 1 VNIR-SWIR reflection spectra of Kaolinite, Halloysite and Montmorillonite. (a) Typical spectral curve; (b) local enlarged drawing of the selected area in Fig. 1(a)

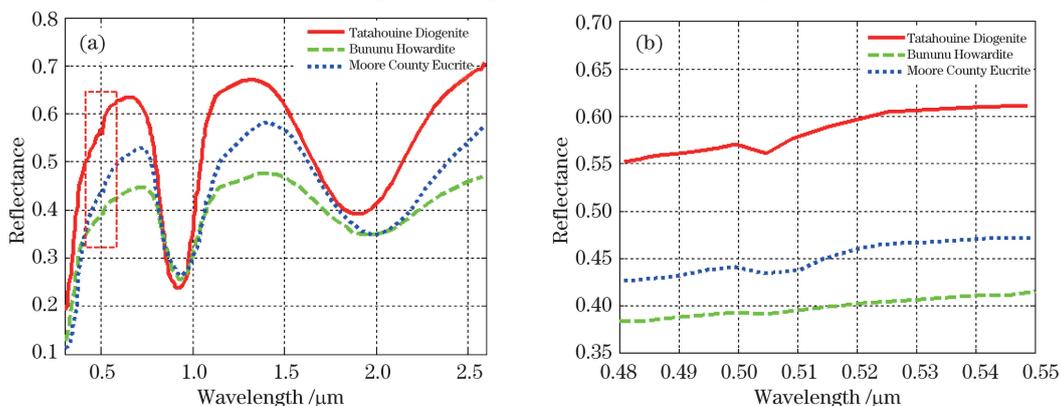


图 2 HEDs 在 VNIR-SWIR 波段的反射光谱。(a) 不同地区 HEDs 的反射光谱; (b) 图 2(a) 中所选区域的局部放大图
Fig. 2 VNIR-SWIR reflection spectra of HEDs. (a) Spectral curve of HEDs from different regions; (b) local enlarged drawing of the selected area in Fig. 2(a)

Eucrite 和 Diogenite 三种陨石的英文缩写。Howardite 的主要成分是角砾岩,而 Eucrite 的主要是辉长岩和玄武岩^[6]。Diogenite 是一种超镁铁质岩浆岩,由纯橄榄岩、方辉橄榄岩等岩石混合而成。图 2(b)是图 2(a)在 0.48~0.55 μm 波段的局部放大图,最小半峰全宽(FWHM)约为 5 nm。依据文献^[7-8],在 VNIR 波段探测铁-镍矿石所需的光谱分辨率要小于 15 nm。依据上述分析,为了能够探测这些矿物,光谱成像光学系统在 VNIR 波段的光谱分辨率要小于 5 nm,在 SWIR 波段则要小于 10 nm。为探测不同类型的小行星和矿物,系统的光谱范围确定为 0.4~2.7 μm。综合考虑到系统信噪比(SNR)、光学性能以及尺寸、质量等限制条件,最终确定系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 系统的主要参数

Table 1 Main parameters of the system

Parameter	VNIR	SWIR
Spectral range /nm	400-1000	1000-2700
Spectral resolution /nm	≤5	≤10
F number	6	3
Pixel size /μm		25
Slit length /mm		10
Smile and keystone /pixel		<10%

3 初始结构计算

基于凸面光栅的 Offner 型光谱成像光学系统具有成像质量好、几何畸变小及相对孔径大等优点^[9-10],适用于高性能光谱成像系统,是小行星探测光学载荷的绝佳选择。本文设计的光谱成像光学系统即采用 Offner 结构,且为了提高系统的紧凑型,减小仪器的体积和质量,系统结构采用了共光路设计,即 VNIR 通道和 SWIR 通道共用同一套光学系统。由于对两个通道的光谱分辨率要求不同,而探测器像元尺寸相同^[11],因此系统中所用的凸面光栅需要分为两个区域,不同区域的光栅分别工作在不同的谱段。图 3 是分区衍射光栅示意图,由两个不同周期的光栅区域组成,其中心区域的光栅为 VNIR 通道光栅,而外部圆环形区域的光栅为 SWIR 通道光栅。

在 Offner 型光谱成像光学系统中,凸面光栅代替了 Offner 中继系统中的凸面反射镜。光栅的引入破坏了光学系统的对称性,像散成为了系统的主要残余像差。基于罗兰圆结构对 Offner 型光谱成像光学系统进行分析,可以计算得到消像散的初始

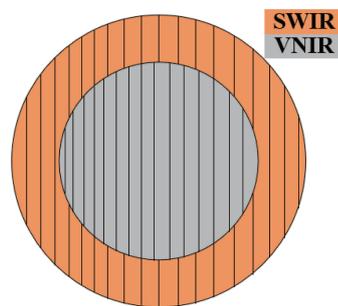


图 3 分区衍射光栅的示意图

Fig. 3 Diagram of the partitioned diffraction gratings structure^[12]。

图 4 是 Offner 系统子午面内罗兰圆成像示意图,C 为三个元件的曲率中心,物点 O 位于反射镜 M1 的罗兰圆上,通过系统后的子午像点 I_M位于反射镜 M3 的罗兰圆上。光栅 G 的曲率半径 R₂满足

$$R_2 = \frac{\Delta l}{m g (\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (1)$$

式中:m 为光栅衍射级次;g 为光栅刻槽线密度;Δl 为谱面宽度;λ₁-λ₂是系统的波段范围。假定反射镜 M3 的偏向角 θ₃已知,根据文献^[12],可得

$$\tan \psi'_n = -\frac{\sin^3 \theta_3}{\cos \theta_3} + \tan \theta_3 \cos(2\theta_3) \tan^2 \psi'_{n-1} - \frac{1 + 2 \sin^2 \theta_3}{2} \tan^3 \psi'_{n-1}, \quad (2)$$

式中:n 为迭代次数;ψ'为像点与 X CZ 面之间的夹角;初始值 ψ'₀为 0。根据

$$\psi' = \psi'_s = \psi'_M = \theta'_2 - 2\theta_3, \quad (3)$$

$$\sin \theta_2 + \sin \theta'_2 = m \lambda g, \quad (4)$$

依次可得光栅出射角 θ'₂和光栅入射角 θ₂,其中 ψ'_s和 ψ'_M为弧矢像面和子午像面与 X CZ 面的夹角。

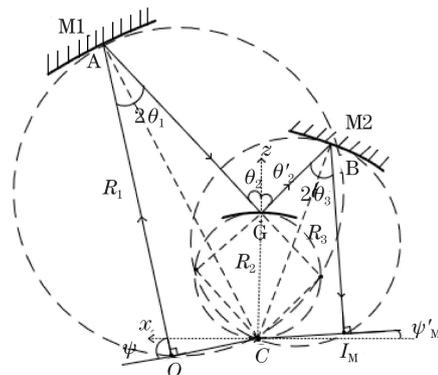


图 4 子午面内罗兰圆成像示意图

Fig. 4 Imaging diagram of Rowland circles on meridional image locations

无子午离焦时,结合三角形正弦条件可得

$$d_{CO} = R_1 \sin \theta_1 = -R_2 \sin \theta_2, \quad (5)$$

$$d_{CI_M} = R_2 \sin \theta'_2 = R_3 \sin \theta_3, \quad (6)$$

式中: d_{CO} 是 C 到 O 之间的距离; d_{CI_M} 是 C 到 I_M 之间的距离。在弧矢面内有

$$\sin \theta_2 \tan \psi = -\sin \theta'_2 \tan \psi'_s. \quad (7)$$

R_1 、 R_2 及其他参数可以结合(2)、(5)、(6)及(7)式计算得到。

图5给出根据上述理论计算初始结构的步骤,

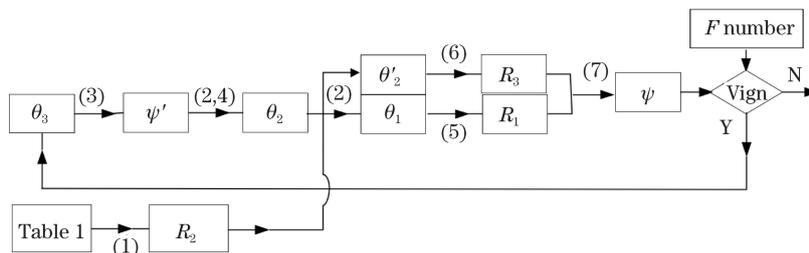


图5 计算初始结构的步骤

Fig. 5 Steps to calculate the initial structure

表2 系统初始结构参数

Table 2 Initial structural parameters of the system

VNIR				SWIR			
Parameter	Value /mm	Parameter	Value /mm	Parameter	Value /mm	Parameter	Value /mm
R_1	-136.3107	$1/g$	0.0083	R_1	-165.8263	$1/g$	0.022
R_2	-69.4444	d_{CO}	33.5520	R_2	-81.1111	d_{CO}	25.0754
R_3	-133.3195	d_{CI_M}	27.7187	R_3	-155.7172	d_{CI_M}	32.3754

4 设计结果

利用光学设计软件 CODE V 对计算得到的 VNIR 和 SWIR 通道初始参数分别进行优化,对比优化结果后发现利用 SWIR 通道初始参数优化得到的系统成像质量更好。最终设计结果如图6所示,光学系统包络尺寸约为 $156 \text{ mm} \times 135 \text{ mm} \times 63 \text{ mm}$ 。

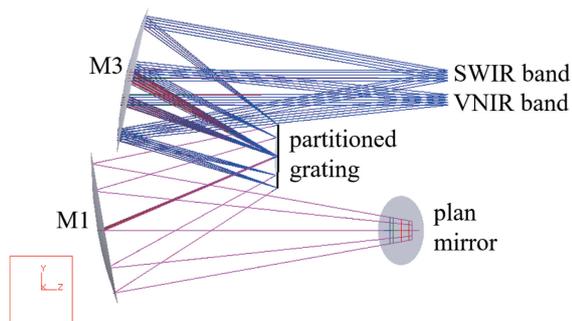


图6 光学系统光路结构图

Fig. 6 Optical layout of the designed optical system

表3给出了不同波长下、不同视场处,设计得到的光谱成像光学系统在 Nyquist 频率处的调制传递

每步所用公式均在图中标出。本文中, VNIR 和 SWIR 通道的中心波长分别为 $0.7 \mu\text{m}$ 和 $1.85 \mu\text{m}$, 衍射级数分别设为 +1 级和 -1 级。VNIR 通道光栅周期初始值取 120 lines/mm, SWIR 通道取 45 lines/mm。假定 θ_3 初始值取 -10° , 分别计算 VNIR 和 SWIR 通道的初始结构,得到的初始结构参数如表2所示。

函数(MTF)值。由表中数据可见,系统的 MTF 值随着波长的增加而逐渐下降,最低的 MTF 值为 0.51。图7是系统在不同波长下各个视场处的点列图。图中黑色方框表示探测器像元的大小,根据仿真结果可知,点列图最大的方均根(RMS)半径出现在 SWIR 通道的 $1.0 \mu\text{m}$ 处,大小为 $10.58 \mu\text{m}$;点列图光斑尺寸均小于单个像元尺寸。

表3 Nyquist 频率(20 lp/mm)处的 MTF 值

Table 3 MTF at the Nyquist frequency (20 lp/mm)

Field of view /mm	VNIR			SWIR		
	$0.4 \mu\text{m}$	$0.7 \mu\text{m}$	$1.0 \mu\text{m}$	$1.0 \mu\text{m}$	$1.85 \mu\text{m}$	$2.7 \mu\text{m}$
(0,0)	0.93	0.86	0.80	0.77	0.70	0.51
(3.7,0)	0.93	0.87	0.80	0.74	0.70	0.53
(5,0)	0.93	0.87	0.79	0.72	0.70	0.54
(-3.7,0)	0.94	0.87	0.80	0.74	0.70	0.53
(-5,0)	0.93	0.87	0.79	0.72	0.70	0.54

对于光谱成像光学系统,谱线弯曲和色畸变是重要的性能指标参数。谱线弯曲表征了不同波长下,狭缝像与理想狭缝像的偏离程度;色畸变表征了不同波长下系统放大倍率的差异。通过光线追迹,

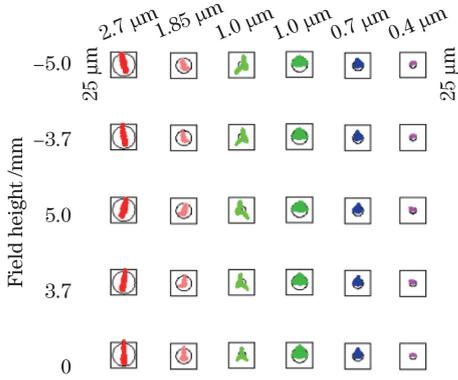


图 7 光学系统点列图

Fig. 7 Spot diagram of designed optical system

获取不同波长、不同视场下的像点重心坐标,能够计算得到系统的谱线弯曲和色畸变值^[13]。图 8 和图 9 分别是设计得到的光谱成像光学系统谱线弯曲和色畸变与归一化视场的关系曲线。由图中数据可知, VNIR 通道谱线弯曲最大值为 2.0 μm,色畸变最大值为 1.1 μm,分别约为像元尺寸的 8.0%和 4.4%。SWIR 通道谱线弯曲最大值为 2.1 μm,色畸变最大值为 1.5 μm,分别约为像元尺寸的 8.4%和 6.0%。

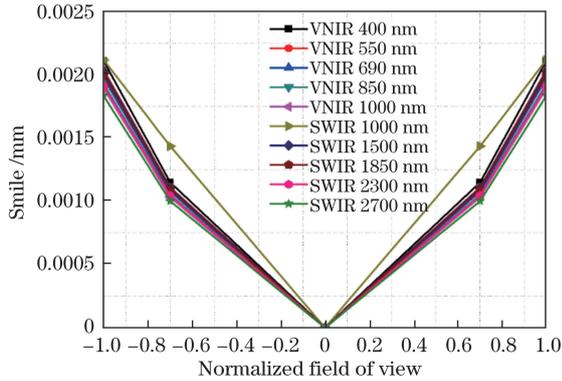


图 8 谱线弯曲与归一化视场的关系曲线

Fig. 8 Curve of the smile versus the normalized field of view

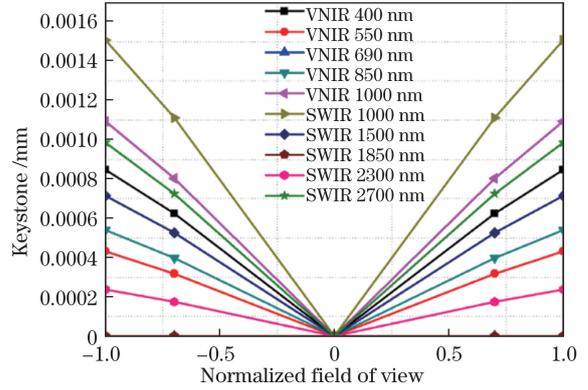


图 9 色畸变与归一化视场的关系曲线

Fig. 9 Curve of the keystone versus the normalized field of view

根据最终光学设计结果,分区凸面光栅中 VNIR 通道光栅周期为 118 lines/mm, SWIR 通道的光栅周期为 40 lines/mm。为了得到较好的系统光谱响应,还需要分别对两个通道的光栅闪耀角进行设计,优化光栅衍射效率随波长的分布。

为改善光学系统在近红外波段以及 400 nm 处的光谱响应,提高系统在两端波长处的信噪比(SNR),考虑将 VNIR 通道光栅分成两个具有不同闪耀角的子区域,这两个子区域分别表示为 B1 和 B2。1) 利用 Comsol 软件计算不同闪耀角下光栅的衍射效率曲线,计算结果如图 10(a)所示。综合考虑光栅的衍射效率和制造难度,确定 B1 区域的闪耀角为 1.25°, B2 区域的闪耀角为 3.5°。2) 计算两个子区域的组合衍射效率,其表达式为

$$\eta_{\text{eff, VNIR}}(\lambda) = r_m \eta_{\text{eff,1}}(\lambda) + (1 - r_m) \eta_{\text{eff,2}}(\lambda), \quad (8)$$

式中:参数 r_m 是区域 B1 面积占比; $\eta_{\text{eff,1}}$ 和 $\eta_{\text{eff,2}}$ 分别是两个区域的衍射效率。图 10(b)为 B1 区域不同面积占比下的衍射效率曲线。当 B1 区域的面积占

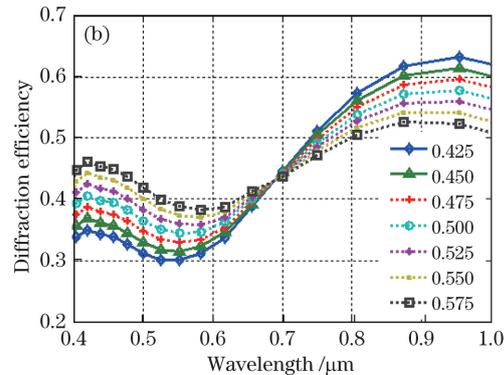
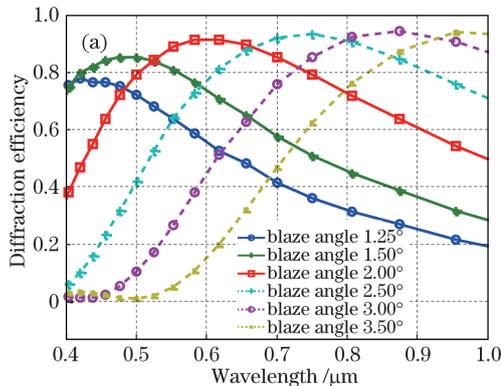


图 10 VNIR 通道光栅的衍射效率。(a) 不同闪耀角下的衍射效率;(b) 不同面积比的组合衍射效率

Fig. 10 Diffraction efficiency of gratings in VNIR band. (a) Diffraction efficiency at different blaze angles; (b) combined diffraction efficiency with different area ratios

比为 0.525 时,光栅衍射效率在近红外波段较高,在 400 nm 处的衍射效率大于 0.4。最低衍射效率值出现在 570 nm 左右,最小衍射效率值为 0.36。

利用 Comsol 软件计算得到的 SWIR 通道光栅在不同闪耀角下的衍射效率曲线如图 11 所示。为在波段范围内获得尽可能高的衍射效率,最终确定 SWIR 通道光栅的闪耀角为 1.9°。根据图 11 中的曲线可知,此时光栅的峰值衍射效率为 0.9 左右,最低衍射效率为 0.46。

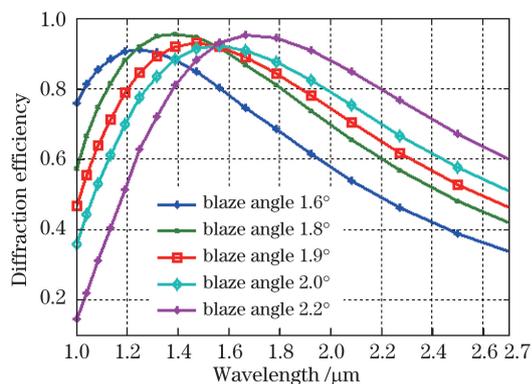


图 11 SWIR 通道光栅的衍射效率

Fig. 11 Diffraction efficiency of gratings in SWIR band

5 原理样机研制及性能测试

根据光学设计结果,开展可见-红外光谱成像光学系统原理样机研制。系统中光学元件材料选用熔石英,机械结构材料采用铝合金。所用的分区凸面光栅采用全息曝光加离子束刻蚀技术研制,研制完成的光栅如图 12(a)所示。由图中可明显看出光栅包含两个具有不同周期的光栅区域。在原理样机中,利用二向色性滤光片将 VNIR 通道和 SWIR 通道的聚焦成像光束分离,采用商用 CCD 相机和短波红外相机进行图像采集,研制完成的样机如图 12(b)所示,样机的包络尺寸为 185 mm×185 mm×91 mm,总质量约 1.7 kg。测试所用 CCD 相机的像元大小为 4.54 μm,工作波段为 0.4~1.0 μm;所用短波红外相机像元大小为 30 μm,工作波段为 0.4~2.35 μm,略小于光学系统设计的工作波段。

VNIR 通道光谱性能测试装置如图 13 所示,测试光源采用汞灯,并利用 CCD 相机在像面处采集光谱图像。汞灯中包含多个特征谱线,采集到的这些特征谱线的图像及强度分布曲线如图 14 所示。对特征谱线进行高斯拟合,计算得到其 FWHM 后,乘以光谱采样间隔得到 VNIR 通道的光谱分辨率,



图 12 分区光栅及原理样机实物图。(a)分区光栅;
(b)原理样机

Fig. 12 Partitioned grating and the prototype of the designed optical system. (a) Partitioned grating;
(b) prototype of the designed optical system

各个谱线的光谱分辨率如表 4 所示,光谱分辨率的平均值为 3.63 nm。通过计算特征谱线空间维质心位置与理想质心位置的偏差,可以计算得到 VNIR 通道的谱线弯曲值。使用平行光管和反射式前置镜头在光谱成像光学系统的狭缝处生成宽波段点光源,分别采集点光源位于狭缝两端和中心处的点色散线,计算两端处和中心处点色散线的斜率差值,乘以狭缝长度得到色畸变值拟合斜率,计算色畸变^[14]。测试结果见表 4, VNIR 通道的最大谱线弯曲量为 7.86% 个像元(25 μm),最大色畸变值为 3.43% 个像元(25 μm)。

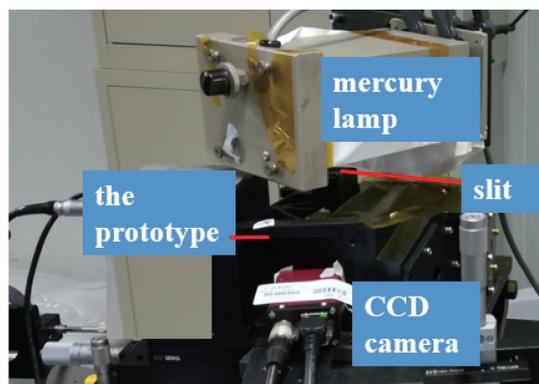


图 13 VNIR 通道光谱性能测试装置图

Fig. 13 Photo of the spectrum performance measurement device for the VNIR band

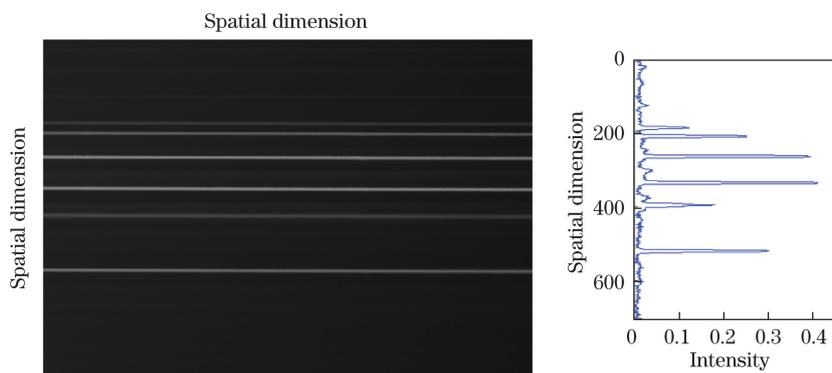


图 14 VNIR 通道特征谱线图及强度分布曲线

Fig. 14 Spectral image and intensity distribution curves in the VNIR band

表 4 VNIR 通道光谱分辨率、谱线弯曲和色畸变测试结果

Table 4 Measurement results of the spectral resolution, smile and keystone in VNIR band

Wavelength /nm	400	550	700	850	1000
Spectral resolution /nm	3.50	3.75	3.71	3.63	3.54
Smile /pixel	7.57%	7.34%	7.39%	7.33%	7.86%
Max keystone /pixel	3.43%				

SWIR 通道光谱性能测试装置如图 15 所示,测试光源采用可调谐激光器。激光器发出的单色光经积分球匀光后照射狭缝,并利用短波红外相机在像面处采集谱线图像。通过调整激光器的出射波长,可以依次获得不同波长的谱线图像。图 16 所示为 1900 nm 波长下获得的谱线图像及强度分布曲线。对不同波长的谱线进行高斯拟合,计算得到 SWIR 通道的光谱分辨率,不同波长的光谱分辨率如表 5 所示,光谱分辨率的平均值为 9.64 nm。对 SWIR 通道的谱线弯曲和色畸变进行测试,测试结果见表 5。根据测试结果可知,最大谱线弯曲量为 8.6% 个像元 (25 μm),最大色畸变值为 5.61% 个像元 (25 μm)。

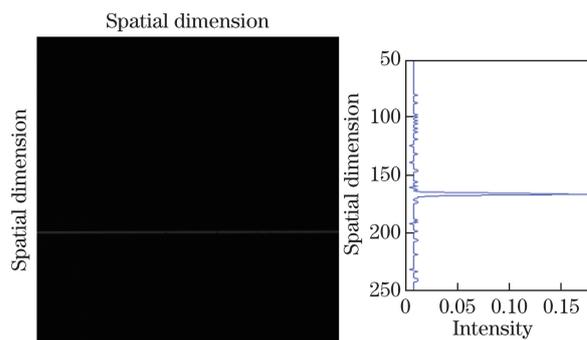


图 16 1900 nm 处狭缝像及光谱强度曲线

Fig. 16 Spectral image and intensity distribution curves at 1900 nm

表 5 SWIR 通道光谱分辨率、谱线弯曲和色畸变测试结果

Table 5 Measurement results of the spectral resolution, smile and keystone in SWIR band

Wavelength /nm	1100	1300	1500	1700	1900
Spectral resolution /nm	9.59	9.61	9.35	9.77	9.89
Smile /pixel	8.6%	7.90%	6.83%	7.33%	8.35%
Maxkeystone /pixel	5.61%				

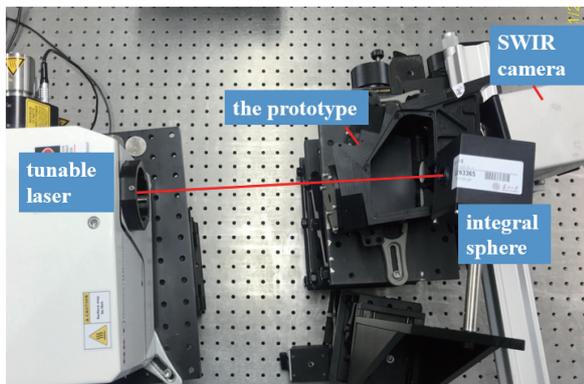


图 15 VNIR 通道光谱性能测试装置图

Fig. 15 Photo of the spectrum performance measurement device for the SWIR band

6 结 论

本研究分析了小行星空间探测任务对光谱成像仪的应用需求,设计了基于共光路结构的宽波段可见-红外 Offner 型光谱成像光学系统,系统结构紧凑,成像性能较好。为了优化系统的光谱响应,对系统中分区衍射光栅的衍射效率进行分析和优化,确定了合适的光栅闪耀角。根据光学设计结果,研制了原理样机,并进行了光谱分辨率、谱线弯曲和色畸变等光谱性能测试,测试结果满足指标要求。

参 考 文 献

[1] Xu W B, Zhao H B. Deep space exploration of

- asteroids: the science perspectives[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(11): 1183-1190.
- 徐伟彪, 赵海斌. 小行星深空探测的科学意义和展望[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(11): 1183-1190.
- [2] Warren J W, Peacock K, Darlington E H, et al. Near infrared spectrometer for the near earth asteroid rendezvous mission[M] // *The Near Earth Asteroid Rendezvous Mission*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997: 101-167.
- [3] de Sanctis M C, Team V, Coradini A, et al. The VIR spectrometer[J]. *Space Science Reviews*, 2011, 163(1/2/3/4): 329-369.
- [4] Reuter D C, Simon A A, Hair J, et al. The OSIRIS-REx visible and InfraRed spectrometer (OVIRS): spectral maps of the asteroid bennu[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(2): 54-76.
- [5] Jiao W X, Zhong J. Identifying potential targets for future near-Earth asteroid exploration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(11): 3955-3959.
- 焦维新, 钟俊. 近地小行星探测目标选择[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(11): 3955-3959.
- [6] Chen H Y, Miao B K, Xie L F, et al. A review to the composition and evolution of the HED meteorites: the differentiated asteroids[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(5): 1037-1052.
- 陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 等. HED族陨石: 分异型小行星物质组成和演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(5): 1037-1052.
- [7] Pieters C M, Binzel R P, Bogard D, et al. Asteroid-meteorite links: the Vesta conundrum(s)[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2005, 1(S229): 273-288.
- [8] Yang D C, Zhang Z G, Chen J, et al. Demand analysis of imaging spectral resolution of geological mineral resources survey[C] // 2nd National Youth Geological Congress, April 18-19, 2015, Chengdu, Sichuan, China. Beijing: Geological Society of China, 2015, 61(Z1): 412-413.
- 杨达昌, 张宗贵, 陈洁, 等. 地质矿产资源调查成像光谱分辨率的需求分析[C] // 第二届全国青年地质大会. 2015年4月18-19日, 成都, 四川, 中国. 北京: 中国地质协会, 2015, 61(Z1): 412-413.
- [9] Huang X J, Jin Y M, Pan Q, et al. Optical design of multi-angle imaging spectropolarimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1118002.
- 黄绪杰, 靳阳明, 潘俏, 等. 多角度偏振成像光谱仪的光学设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 1118002.
- [10] Zhu Y J, Yin D Y, Chen Y H, et al. Design of hyperspectral resolution ultraviolet offner imaging spectrometer system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0222001.
- 朱雨霁, 尹达一, 陈永和, 等. 高光谱分辨率紫外Offner成像光谱仪系统设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0222001.
- [11] Fièque, B, Meynart R, Neeck S P, et al. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIV: Sofradir detectors for hyperspectral applications from visible up to VLWIR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7826: 78261I.
- [12] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9156-9168.
- [13] Schlapfer D, Nieke J, Itten K I. Spatial PSFnonuniformity effects in airborne pushbroom imaging spectrometry data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(2): 458-468.
- [14] Mouroulis P. Pushbroom imaging spectrometer with high spectroscopic data fidelity: experimental demonstration[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(3): 808-816.