

双谱段 Offner 光谱成像仪设计

周 峰, 郑国宪, 李 岩, 姚 罡

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要: 相比基于平面或凹面光栅的光谱成像仪, 采用凸面光栅作为分光元件的 Offner 光谱成像仪具有数值孔径大、无谱线弯曲、色畸变小、结构紧凑和加工装调简单等诸多优点, 在各个领域获得越来越多的应用。为了满足深空探测任务对载荷高度集成化、宽光谱响应范围、轻小型化等多方面严格要求, 采用 Offner 结构设计了一种双谱段光谱成像仪, 并巧妙地利用光栅分区分光, 使系统在宽谱段内具有优良的像质, 且体积小、结构简单, 满足了设计要求。光学系统所有反射曲面均为球面, 公差较松, 有利于加工和装调。对凸面光栅进行了设计, 并分析了其衍射效率, 该设计可以有效扩大整个系统的动态范围。

关键词: 光谱成像仪; 双谱段; Offner; 光学设计; 衍射效率

中图分类号: TH744.1; O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1858-05

Design of dualband Offner spectral imager

Zhou Feng, Zheng Guoxian, Li Yan, Yao Gang

(Beijing Institute of Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Compared with spectral imager based on the flat or concave grating, the Offner spectral imager which utilizes convex grating as the diffractive element has several advantages, such as large numerical aperture, no Smile, small spectral Keystone, compact volume, easy manufacturing and alignment, etc. Consequently, it's becoming widely applied in many fields. In order to meet the requirements of highly integrated, broad working spectrum and miniaturized payload for deep space exploration mission, in this article, an Offner spectral imager with dualband was designed. At the same time, a neatly spectral splitting method using different part of grating was implemented. The system which met the design requirements had fine image quality, small volume and compact configuration. All reflective curves of the optics were designed sphere, which had loose tolerance and were convenient for manufacturing and alignment. The convex grating was framed and its diffraction efficiency was analyzed. The result shows that the dynamic range of the whole system can be enlarged effectively using the elaborate design.

Key words: spectral imager; dualband; Offner; optical design; diffraction efficiency

收稿日期: 2012-11-11; 修订日期: 2012-12-10

作者简介: 周峰(1974-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光学遥感载荷总体设计与方案论证方面的研究。Email: zfsimon@163.com

0 引言

光谱成像技术将成像技术和光谱技术结合在一起,是一种将光学、光谱学、精密机械、电子技术以及计算机技术融于一体的新型遥感技术。而近年来出现的高光谱成像技术则将光谱成像技术提升到一个新的水平,由于其卓越的信息获取能力,十多年来得到了飞速的发展,在卫星遥感、地质探测、精准农业、生产制造和军事侦察等领域具有广阔的应用前景。近几年,该技术更受到深空探测领域科学家的青睐,在多次深空探测任务中获得应用。

由于深空探测目标距离地球遥远,为了降低发射成本和风险,获得更多有价值的科学发现,对光谱仪的轻小型化和性能提出了更高的要求,尤其在光谱范围、光谱分辨率、系统效率等方面。Offner 凸球面光栅光谱成像是美国喷气动力实验室(JPL)的一项专利技术^[1],因其具有数值孔径大、无谱线弯曲、色畸变小、结构紧凑和加工装配简单等诸多优点^[2-5],不但成为高光谱成像系统的一种重要光学系统形式,更成为深空探测领域的首选,在卡西尼土星探测器^[6]、罗塞塔号彗星探测器^[7]、金星快车^[8]、火星勘测轨道器^[9]、黎明号小行星探测器^[10]等多次深空探测任务中获得成功应用。

1 Offner 光谱成像系统

Offner 光谱成像仪是在 1973 年 Offner 提出的同心三反射镜中继光学成像系统的基础上发展而来的。典型的 Offner 成像系统是一个三反射式同心光学系统,由一个大的凹面反射镜和一个小的凸面反射镜组成,且拥有共同的球心 C,结构如图 1 所示。通过合理的配置系统,可以形成一个无像差的共面

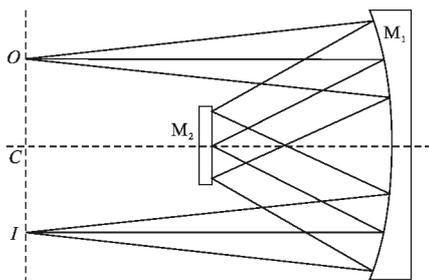


图 1 Offner 同心三反射成像系统示意图

Fig.1 Offner concentric three-mirror imaging system

共轭物平面和像平面,垂直于光轴且过球心。从物点 O 发出的光线,经过系统的三次反射,以 1:1 的比例无失真形成像点 I。当凹面镜的半径等于凸面镜半径的 2 倍时,系统没有 3 阶像差(球差、彗差、畸变),只剩下 5 阶以上的系统像差。此外,系统采用全反射式结构,不存在色差。

为提高空间分辨率和光谱分辨率,高光谱成像系统往往要尽可能地减小谱线弯曲和色畸变。谱线弯曲是指狭缝以不同波长成像时,狭缝的像不再是一条平行于狭缝的直线,而是一条曲线。谱线弯曲量通常用曲线两端与中心点的偏移量来表示。由于不同的波长具有不同的放大率,当系统对狭缝上的离轴点成像时,不同波长的像点将不在垂直于狭缝的一条直线上,而是形成一条斜线,引起色畸变。色畸变会导致物点不同波长的像点不在探测器的同一列像元上,为后续数据处理带来了一定的困难。与传统准直光束中使用光栅或棱镜的光谱成像系统相比,Offner 光谱成像系统完全解决了谱线弯曲的问题,色畸变也能达到可以忽略的程度,且具有平像场和体积小的优点^[11]。

2 双谱段 Offner 光谱成像系统设计

该光谱成像仪光学系统要求设计工作波长范围为 0.25~5 μm ,包括紫外可见光近红外谱段 0.25~1.05 μm 和红外谱段 1~5 μm 两个通道,对成像性能、体积和质量等要求都非常高。考虑到透射系统难以实现如此宽的工作波长,采用反射式系统。在对比了多种国内外高光谱成像仪光学系统后,考虑到目前光学设计与加工技术水平,给出了一个小型化、全反射式高光谱成像仪光学系统设计结果,如图 2 所示。

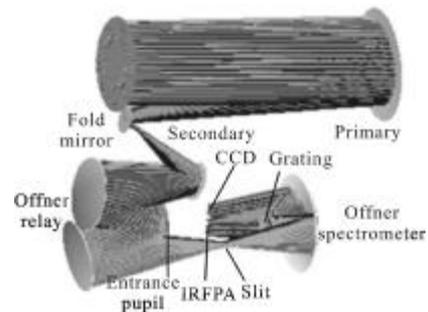


图 2 光学系统设计结果

Fig.2 Optical system design result

该光学系统由 Shafer 望远系统和一个凸面光栅光谱成像系统组成, 其中 Shafer 望远系统由反转 Burch 望远镜和 Offner 中继组成。反转 Burch 望远镜由主镜、折转镜和次镜组成, 用于消除球差和彗差。Offner 中继用于消除像散和平像场, 系统入瞳位于 Offner 中继凸面镜上。入射光经过 Shafer 望远系统后, 在狭缝处获得高品质图像, 最后经过 Offner 光谱仪将狭缝的 $0.25\sim 1\ \mu\text{m}$ 和 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 两个谱段分别成像到 CCD 和 IRFPA 焦面上。其中 Offner 中继在 y 方向延伸, Offner 光谱仪在 x 方向延伸, 两个谱段探测器在 y 方向延伸。

此光谱仪视场角为 3.6° , 焦距 $95\ \text{mm}$, 角分辨率为 $0.4\ \text{mrad}$, 光谱分辨率 $2\sim 10\ \text{nm}$ 。IRFPA 采用像元尺寸 $38\ \mu\text{m}$ 的 HgCdTe 红外探测器, CCD 采用像元尺寸 $19\ \mu\text{m}$ 的 Thomson-CSF TH7896, 采用 2×2 像元合并工作方式, 以使两个谱段分辨率匹配。

光学系统结构参数如表 1 所示。该系统采用的分光方法即非视场分光也非棱镜分光, 而是采用同一光栅区分光, 通过巧妙的设计, 在保证整个谱段范围内衍射效率的同时, 使系统大大简化, 结构更加紧凑, 为结构支撑和质量指标赢得更多空间。且除了折转反射镜外, 所有反射面包括光栅均为球面, 公差较松, 便于加工和装调。

表 1 光学系统结构参数

Tab.1 Optical system configuration parameters

Surf	Rad/mm	Thi/mm	Gla	Tilt X /($^\circ$)	Tilt Y /($^\circ$)	Dec X /mm
1	Infinity	125	-	0	-	-
2	-260.277	-120	Mirror	-6.4	-	-
3	Infinity	48.707	Mirror	25	-	-
4	459.825	-51.275	Mirror	-22	-	-
5	87.793	39.217	Mirror	12.19	-	-
STO	55.012	-41.323	Mirror	-22	-	-
7	82.165	114.950	Mirror	10.27	-	-
8	-	0	Break	-	-	11
9	-43.075	-20.111	Mirror	0	-	-
10	-22.390	20.111	Grating	0	-	-
11	-43.320	-44.404	Mirror	0	-	-
12	-	1.974	Break	-	0.214	0.216
IMA	Infinity	-	-	0	-	-

两个谱段不同波长处的 MTF 如图 3 和图 4 所示, 设计结果均满足技术指标要求。两个谱段不同视场的弥散斑如图 5 和图 6 所示, 其中紫外可见光近红外谱段各视场弥散斑均在一个像元之内, 红外谱段有几个视场弥散斑超出一个像元, 但能量 95% 以上都在一个像元之内, 设计结果均满足技术指标要求。

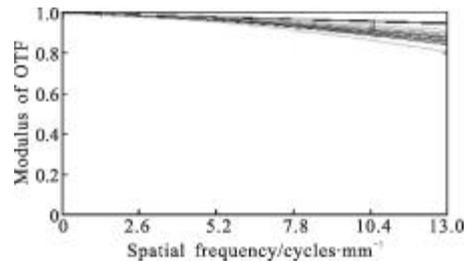


图 3 紫外可见光近红外谱段 MTF (@ $0.7\ \mu\text{m}$)
Fig.3 MTF of UV-V-NIR channel

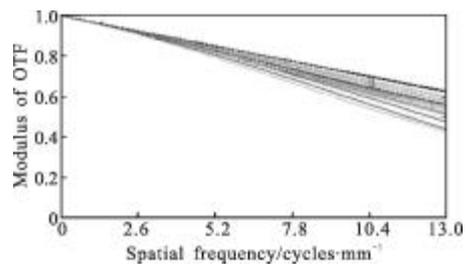


图 4 红外谱段 MTF (@ $3\ \mu\text{m}$)
Fig.4 MTF of IR channel

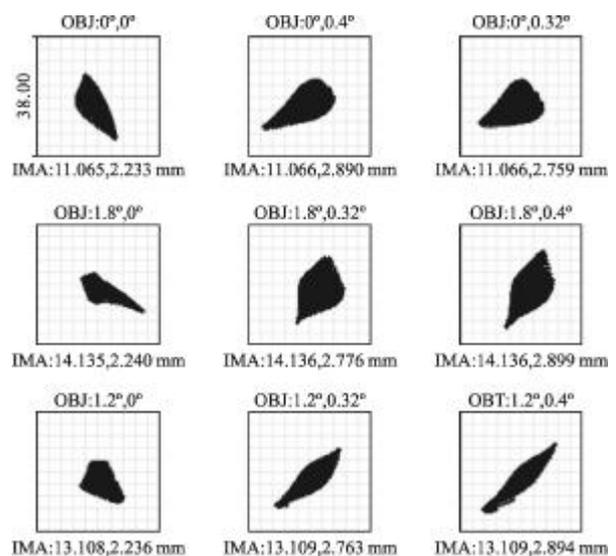


图 5 紫外可见光近红外谱段的弥散斑
Fig.5 Spot diagram of UV-V-NIR channel

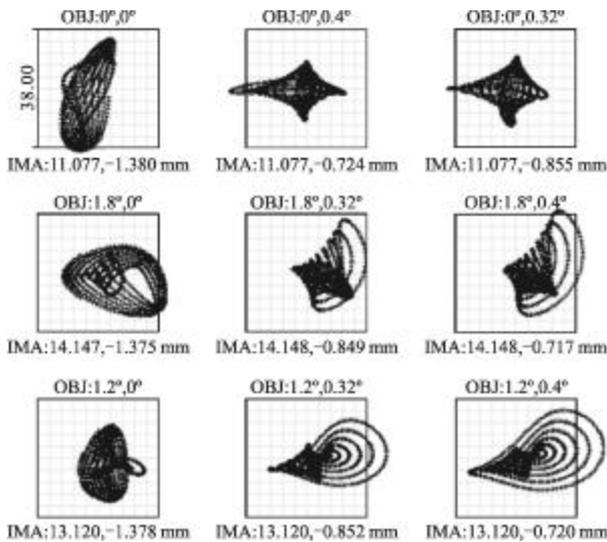


图 6 红外谱段的弥散斑

Fig.6 Spot diagram of IR channel

3 光栅设计与衍射效率计算

光栅的衍射效率随入射光的波长而发生改变,如果谱段范围较宽,则无法使整个谱段范围内的所有波长均实现较高的衍射效率,甚至会出现衍射效率为零的情况。文中设计的光谱仪光谱范围非常宽,这就需要合理的设计光栅,才能保证整个光谱范围内所有波长均获得较高的衍射效率,以提升整个系统的光学效率。

3.1 光栅衍射理论推导

根据海德曼衍射理论,光栅衍射效率为^[12]:

$$\text{eff}(\lambda) = \left| \int_{-d/2}^{d/2} \frac{A \exp\left(\frac{2\pi}{\lambda} i(k_a - k_b)r\right)}{d} \right|^2 \quad (1)$$

式中: i 为单位虚数; λ 为波长; d 为光栅常数; k_a 为入射向量; k_b 为衍射向量; $r(x, y, z(x))$ 为光栅的刻槽向量; A 为遮蔽因子,垂直入射时其一级近似为 1。

参考坐标系如图 7 所示。 x 轴垂直于刻槽方向, y 轴平行于刻槽方向, z 轴垂直于光栅面。 $z(x)$ 为刻槽深度:

$$z(x) = \begin{cases} \frac{h}{2} - \frac{d}{2} < x < 0 \\ 0 & x = 0 \text{ and } x = \pm \frac{d}{2} \\ -\frac{h}{2} & 0 < x < \frac{d}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: h 为刻槽深度常量。

$$k_a = (\sin(\alpha)\cos(\psi), \sin(\psi), \cos(\alpha)\cos(\psi)) \quad (3)$$

$$k_b = (-\sin(\beta)\cos(\varphi), \sin(\varphi), -\cos(\beta)\cos(\varphi)) \quad (4)$$

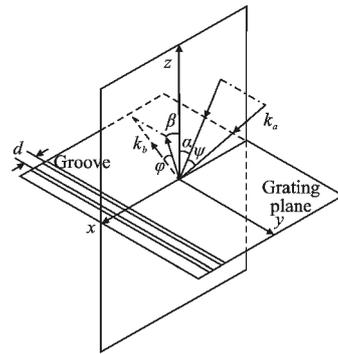


图 7 光栅参考坐标

Fig.7 Reference coordinate of grating

衍射级次为 j , 由下式确定:

$$\sin(\alpha)\cos(\psi) + \sin(\beta)\cos(\varphi) = \frac{j\lambda}{d} \quad (5)$$

式中: $\varphi = \psi$ 。

经过推导,最后得出衍射效率为:

$$\text{eff}(\lambda) = \frac{4}{\pi^2 j^2} \sin^2\left(\frac{\pi h}{\lambda} \cos(\varphi) (\cos(\alpha) + \sqrt{1 - \left(\frac{j\lambda}{d\cos(\varphi)} - \sin(\alpha)\right)^2})\right) \quad (6)$$

不同的刻槽深度会产生不同的衍射效率曲线,对于不同区域刻槽深度不同的光栅,总的光栅衍射效率:

$$\text{eff}_m(\lambda) = r_m \text{eff}_1(\lambda) + (1 - r_m) \text{eff}_2(\lambda) \quad (7)$$

式中: r_m 近似等于该区域光栅与光栅总面积之比。

3.2 光栅设计

两个谱段的分光通过在一个光栅基底上不同区域刻蚀不同密度的刻槽来实现,如图 8 所示。其中紫外可见光近红外谱段光栅密度为 96 lp/mm,红外谱段光栅密度为 60 lp/mm。在紫外可见光近红外谱段,通过刻蚀不同深度的凹槽实现不同谱段的衍射效率,以提高在短波和长波谱段的衍射效率。这样可以降低

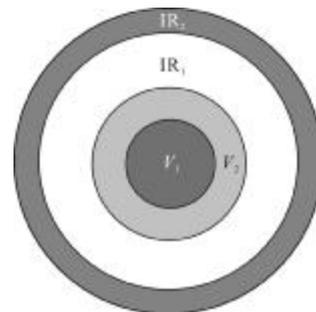


图 8 光栅刻蚀示意图

Fig.8 Sketch map of grating etching

可见光谱段的阈值,提高两端紫外和近红外波长的信噪比,扩大系统动态范围。并通过镀不同的反射膜,使红外区域只反射红外谱段的入射光,紫外可见光近红外区域只反射紫外可见光近红外谱段的入射光。

其中 V_1 占紫外可见光近红外总面积的 0.55,刻槽深度 260 nm, V_2 占紫外可见光近红外总面积的 0.45,刻槽深度 390 nm,紫外可见光近红外谱段占光栅总面积的 0.3,光栅密度 96 lp/mm。设计结果如图 9 所示,从设计结果可以看出,如果采用同种深度的刻槽,难以避免出现低衍射效率甚至为零的情况。而通过合理设计,衍射效率可以在太阳辐射最强和 CCD 光谱响应最高的谱段处获得较低的衍射效率,随着谱段向紫外和近红外两个方向延伸,衍射效率不断提高。

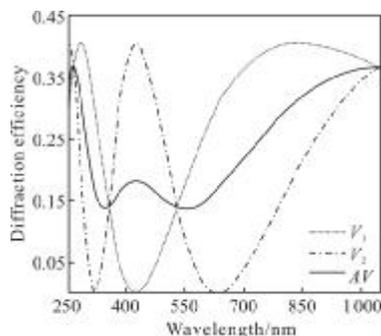


图 9 光栅紫外可见光近红外谱段衍射效率

Fig.9 Diffraction efficiency of grating in UV-V-NIR channel

IR_1 占红外总面积的 0.7,刻槽深度 1 000 nm, IR_2 占红外总面积的 0.3,刻槽深度 600 nm,红外占光栅总面积的 0.7,光栅密度 48 lp/mm。设计结果如图 10 所示,刻槽深度和面积比例同样根据探测器光谱响应和目标光谱辐射进行设计,使系统的动态范围得到扩大。

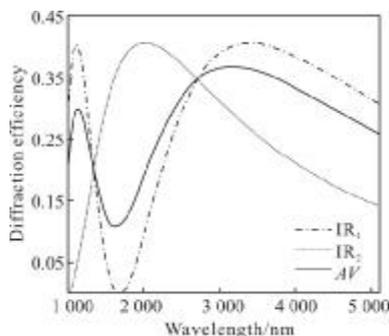


图 10 光栅红外谱段衍射效率

Fig.10 Diffraction efficiency of grating in IR channel

4 结 论

光谱成像仪光学系统的设计需要综合考虑性能、体积和质量等多种因素。文中所设计的光谱仪采用凸面光栅作为色散元件的 Offner 光谱成像系统,并通过巧妙的设计,实现一个光栅对宽谱段 0.25~5 μm 范围内的两个谱段进行分光 and 衍射,设计结果的 MTF 和弥散斑均优于技术指标要求。该系统采用全反射式结构,增强了系统的空间环境适应性,与分视场分光法和分色片分光法相比,体积小,结构简单。并对光栅衍射效率进行了分析,结果表明,光栅衍射效率不仅满足技术指标要求,而且衍射效率曲线可以设计成与探测器量子效率曲线互补,扩大了整个系统的动态范围。

参考文献:

- [1] Offner A. Unit power imaging catoptric anastigmat: US, 3748015[P]. 1973-7-24.
- [2] Ji Yiqun, Shen Weimin. Design and manufacture of Offner convex grating hyper-spectral imager[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 285-287. (in Chinese)
- [3] Mouroulis P. Low-distortion imaging spectrometer designs utilizing convex gratings [C]//SPIE, 1998, 3482: 594-601.
- [4] Lobb D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers[J]. Appl Opt, 1994, 33: 2648-2658.
- [5] Mertz L. Concentric spectrographs [J]. Appl Opt, 1977, 16: 3122-3124.
- [6] Miller E, Klein G, Juergens D, et al. The visual and infrared mapping spectrometer for Cassini[C]//SPIE, 1996, 2803: 206-220.
- [7] Coradini A, Capaccioni F, Drossart P, et al. VIRTIS: an imaging spectrometer for the ROSETTA mission [J]. Planetary and Space Science, 1998, 46(9/10): 1291-1304.
- [8] Piccioni G, Drossart P, Suetta E, et al. VIRTIS imaging spectrometer for the ESA/Venus Express mission [C]//SPIE, 2004, 5543: 175-185.
- [9] Silverglate P R, Fort D E. System design of the CRISM (compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars) hyperspectral imager[C]//SPIE, 2003, 5159: 283-290.
- [10] Russell C T, Coradini A, Christensen U, et al. Dawn: A journey in space and time [J]. Planetary and Space Science, 2004, 52: 465-489.
- [11] Zheng Yuquan. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6): 650-657. (in Chinese)
- [12] Piccioni G, Amici S, Fonti S, et al. Efficiency measurements of the VIRTIS-M grating [J]. Planetary and Space Science, 2000, 48: 411-417.