文章编号 1004-924X(2012)01-0052-06

凸面光栅成像光谱仪的研制与应用

刘玉娟[1,2*]，崔继承[1,2]，巴音贺希格[1]，陈少杰[1,2]，齐向东[1]，唐玉国[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院 研究生院，北京 100049)

摘要：考虑传统光栅成像光谱仪受光学畸变的限制难以同时实现大光学孔径和小型化要求，利用全息法设计并制作了凸面光栅，并以该凸面光栅作为核心元件研制了便携式成像光谱仪。该光谱仪以推扫方式进行目标扫描，获取成像光谱数据立方。仪器的光谱分辨率为 2.4 nm，光谱谱线弯曲为 0.1%，色畸变为 0.6%，体积为 209 mm×199 mm×110 mm。介绍了仪器的工作原理和结构设计，并进行了实验室检测和室外花卉实际光谱测量。测试结果表明：凸面光栅成像光谱仪的光谱分辨率为 2.1 nm，光谱谱线弯曲为 0.09%，色畸变为 0.6%，均满足设计要求，实际花卉光谱测试亦取得了较为理想的结果。

关 键 词：成像光谱仪；凸面光栅；全息术；数据立方
中图分类号：TH744.1 **文献标识码**：A **doi**：10.3788/OPE.20122001.0052

Design and application of imaging spectrometer with convex grating

LIU Yu-juan[1,2*], CUI Ji-cheng[1,2], Bayanheshig[1], CHEN Shao-jie[1,2], QI Xiang-dong[1], TANG Yu-guo[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: xuliuyujuan@163.com*

Abstract: As traditional grating-based spectrometers can not offer fast apertures and small volume systems synchronously, this paper designs a convex grating by using holography and develops an imaging spectrometer with the convex grating as a core element. It acquires the image of target by pushbroom scanning, then obtains the data cubes of the imaging spectra. The image spectrometer has a space resolution of 2.4 nm, a spectral line bend of 0.1%, the chromatic distortion of 0.6%, and a volume of 209 mm×199 mm×110 mm. The principle of imaging spectrometer with convex grating is analyzed and its constructs are described. Then, a spectral experiment in the laboratory is carried out and the spectra of extraventricular flowers are tested. The result demonstrates that the real spectral resolution is 2.1 nm, line bend is 0.09% and the chromatic distortion is 0.6%. These data satisfy the design requirement, and obtained spectra are ideal results.

收稿日期：2010-10-19；**修订日期**：2011-01-11.
基金项目：国家创新方法工作专项资助项目(No. 2008IM040700)；吉林省科技支撑计划资助项目(No. 20106011)

Key words: imaging spectrometer; convex grating; holography; data cube

1 引　言

成像光谱技术是 20 世纪 80 年代起源于遥感探测领域“图谱合一”的新型分析技术，通过在连续成像空间上进行连续光谱测量对目标进行“定性、定量、定时、定位”分析和动态过程监测，实现了空间图像与光谱数据的统一。目前，主要应用于资源勘查、军事侦察、自然资源开发等领域，成像光谱仪是实施此项技术的基本设备。成像光谱仪由前置望远系统和分光系统两部分组成，分光系统是成像光谱仪的关键部分，常见的分光模式有色散型和干涉型，色散型所使用的色散元件主要有：色散棱镜、干涉滤光片、平面闪耀光栅等[1]。光栅色散成像光谱仪由于比棱镜、滤波器、干涉型等其他类型成像光谱仪具有显著优点而得到越来越广泛的应用[2-4]。传统光栅色散型成像光谱仪的主要限制因素是当系统孔径大时，会产生较大的光学畸变、高衍射级次的杂散光等，这严重地影响了光谱的纯度并限制了后期数据处理算法的精确度。1987 年 D. Kwo 首次提出了基于 Offner 同心分光结构的凸面光栅成像光谱仪，该系统以凸面光栅为色散元件，结构简单、易实现大孔径但系统存在像散或彗差[5]；1999 年，M. P. Chrisp 对系统进行了改进，显著提高了凸面光栅成像光谱仪的成像质量[6]。与传统成像光谱仪相比，基于 Offner 同心结构的凸面光栅成像光谱仪的分光系统仅由 3 个光学元件组成，设计本身具有大孔径、低光学畸变、结构简单、易于实现小型化的特性[7-8]，这大大降低了成像光谱仪的设计难度和后端数据处理的复杂度，提高了成像光谱分析的准确度；但是受到凸面光栅制造水平的限制，凸面光栅成像光谱仪在最初并未得到推广应用。近年来，随着光栅制造技术的发展，凸面光栅成像光谱仪逐渐从理论研究走向实际应用[9-12]。美国国家航空航天局（NASA）、欧洲宇航局（ESA）等已经将凸面光栅成像光谱仪成功地应用于高指标的航空、航天任务中，完成了月球表面高分辨率矿物质探测、火星矿物质探测等[13-14]。国内关于凸面光栅成像光谱仪的研究也越来越多，但大多停留在实验室研究阶段[13-16]，实际应用相对较少。鉴于此，本文设计并利用全息法制作了凸面光栅，并利用该凸面光栅作为核心元件研制了便携式凸面光栅成像光谱仪，该仪器以推扫方式扫描目标，从而获取目标的成像光谱数据立方，经测试以及室外实验，各项指标均满足设计要求。

2 凸面光栅成像光谱仪的设计

2.1 基本原理

凸面光栅成像光谱仪由前置望远系统和凸面光栅分光系统两部分组成[9]。沿狭缝方向的探测目标条带经望远系统成像在狭缝上，后经凸面光栅分光系统分光后形成光谱像并由探测器接收。通过空间连续推扫方式获得了目标的成像数据立方，对目标进行空间分析和成分识别。

为了提高成像光谱仪的数值孔径同时避免产生渐晕，前置望远系统设计必须满足以下要求：(1)具有物方远心结构；(2)与凸面光栅分光系统数值孔径匹配；(3)具有较大的相对孔径以满足信噪比要求。透射式前置系统具有体积小、视场大、角弥散＜25 rad 等优点，采用透射式光学系统的设计，能够得到较大的视场和相对孔径[17]。

凸面光栅分光系统是凸面光栅成像光谱仪的核心部分，直接决定着成像光谱仪的光谱特性。凸面光栅分光系统的结构如图 1 所示，该系统仅由 3 个光学元件组成：2 个凹球面反射镜和 1 个

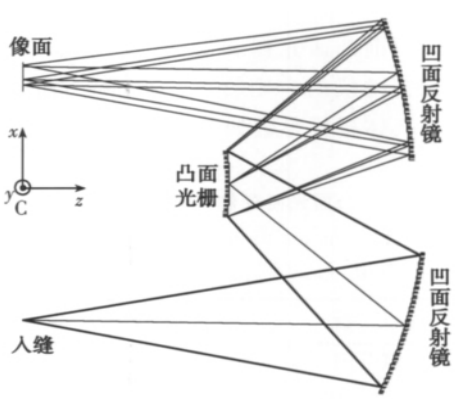


图 1　凸面光栅分光系统结构图

Fig. 1　Schematic diagram of spectrometer with convex grating

凸面光栅，同时 3 个光学元件共球心，凸面光栅位于两球面反射镜之间，是分光系统的关键元件，也是限制凸面光栅成像光谱仪效率的主要因素。

2.2　仪器设计

2.2.1　指标的设计

成像光谱仪的光谱范围由目标的反射光谱特性决定。凸面光栅成像光谱仪利用太阳光作为连续光源，其光谱设计为 400～800 nm。

光谱分辨率是成像光谱仪性能的主要指标之一，光谱分辨率越高，物质识别精度越高，凸面光栅成像光谱仪的光谱分辨率可达几个纳米。

由光栅方程式

$$m\lambda = d(\sin i + \sin\theta). \tag{1}$$

导出光栅的线色散为

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}\lambda} = f\frac{m}{d\cos\theta}. \tag{2}$$

再根据 M. P. Chrisp 的罗兰圆配置[6]，

$$f = R\cos\theta. \tag{3}$$

则凸面光栅线色散为

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}\lambda} = mnR. \tag{4}$$

光谱仪的光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = h/mnR, \tag{5}$$

其中 m 为衍射级次，λ 为闪耀波长，R 为光栅曲率半径，n 为光栅刻线密度，i 为入射角，θ 为衍射角，d 为光栅常数，h 为探测器像元尺寸。由式(5)可见，凸面光栅成像光谱仪的光谱分辨率与衍射级次、光栅曲率半径、光栅刻线密度以及探测器像元尺寸有关，高光谱分辨率对光栅和探测器的要求更高。

针对目前凸面光栅和探测器制造水平、凸面光栅成像光谱仪的应用特点，设计的凸面光栅成像光谱仪具体指标参数如表 1 所示。

表 1　凸面光栅成像光谱仪系统参数

Tab. 1　Parameters of imaging spectrometers with convex grating

参　数	数　值
光谱范围	400～800 nm
光谱分辨率	2.4 nm
视场角	20°×0.5°
焦距	30 mm
系统 $F^{\#}$	3.5

2.2.2　核心元件的设计

凸面光栅作为凸面光栅成像光谱仪分光系统的核心元件，直接决定了成像光谱仪的仪器性能和尺寸。目前，凸面光栅的制作方法有全息法、离子束刻蚀法、电子束光刻法、X 射线光刻法[18-19]。根据实验室现有的设备情况，采用全息法制作凸面光栅。根据式(4)，凸面光栅的参数如表 2 所示。

表 2　凸面光栅参数表

Tab. 2　Parameters of convex grating

参　数	数　值
光谱范围	400～800 nm
使用级次	−1
刻线密度	150 lp/mm
曲率半径	73.33 mm

制作的凸面光栅原子力显微镜三维形貌如图 2 所示，槽深 150 nm，占宽比 0.5，周期 6.65 μm。凸面光栅的衍射效率曲线如图 3 所示，整个波段内衍射效率理论上均高于 30%，在 540～680 nm 内，实际效率与理论值相等；在 400～540 nm 和 680～800 nm 内，实际效率略低于理论值，完全满足仪器在短焦距的使用要求。

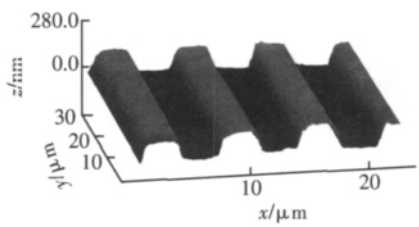


图 2　凸面光栅的原子力形貌图

Fig. 2　AFM diagram of groove of convex grating

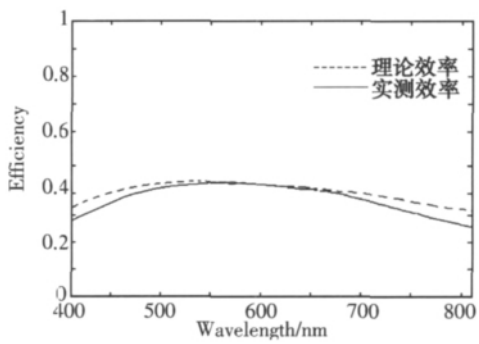


图 3　凸面光栅衍射效率曲线

Fig. 3　Efficiency curve of convex grating

2.2.3　光学设计

凸面光栅分光系统采用同心结构和罗兰圆配置，虽然在中心波长实现了零像散，但在边缘波长像散较大。为了实现整个波段范围内成像质量的均匀，在光学设计时对传统 Offner 结构进行改进，结合前端光学系统进行了光谱仪的一体化设计，使狭缝和像面偏移并倾斜微小角度，实现边缘波长与中心波长成像质量的均衡，很好地控制了系统球差、象散和场曲。图 4 为光学系统整体图，凸面光栅成像光谱仪的光学系统像差曲线如图 5 所示，从图中可以看到采用了 Offner 结构的凸面光栅成像光谱仪，通过光学系统的一体化设计其球差、象散和畸变均得到了很好的结果。

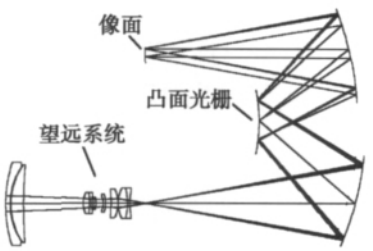


图 4　凸面光栅成像光谱仪的光学系统图

Fig. 4　Optical design of imaging spectrometer with convex grating

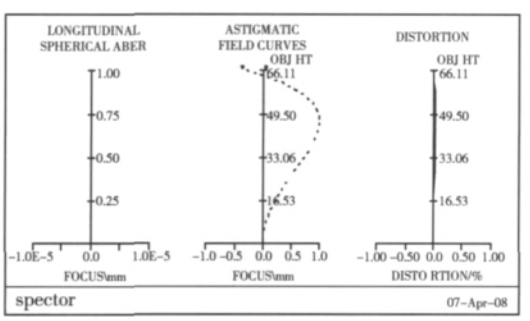


图 5　凸面光栅成像光谱仪光学系统像差曲线

Fig. 5　Aberration curves of imaging spectrometer with convex grating

研制的凸面成像光谱仪外部结构如图 6 所示，仪器尺寸为 209 mm×199 mm×110 mm。

3　凸面光栅成像光谱仪测试及应用

3.1　实验检测及分析

3.1.1　光谱分辨率测试

利用研制的凸面光栅成像光谱仪对汞灯进行成像光谱测量，探测器采集到汞灯 400～800 nm 光谱曲线如图 7 所示。由图可见，凸面光栅成像光谱仪可以清晰分离汞灯光谱中 577.0 nm 和 579.1 nm 两条谱线，即在波长为 578.0 nm 处光谱分辨率为 2.1 nm，满足光谱分辨率为 2.4 nm 的设计要求。

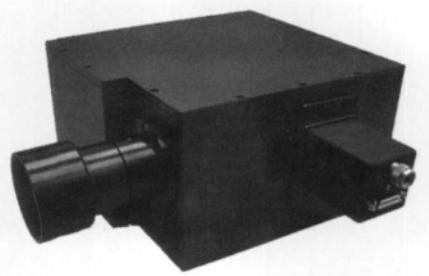


图 6　研制的凸面成像光谱仪外部结构

Fig. 6　Layout of imaging spectrometer with convex grating

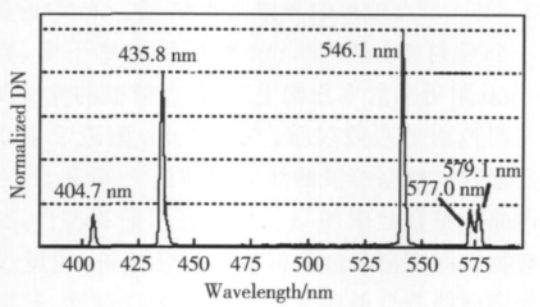


图 7　汞灯光谱曲线

Fig. 7　Spectral line of Hg-lamp

3.1.2　谱线弯曲和色畸变测试

凸面光栅成像光谱仪理想情况下光谱的谱线弯曲和色畸变均为 0[7-8]。谱线弯曲是指狭缝的光谱图像与理想图像的偏离，当偏移量大于像元的 1/2 时，引起光谱混淆。色畸变是由不同波长的放大倍率的差异而引起的同一视场图像的像高之差。色畸变量大于一个像元时就会导致不同波长的像点不在探测器同一行像元上，这为数据处理带来一定的困难。实际系统中总是存在一定的谱线弯曲和色畸变，探测得到的 400，600 和 800 nm 全视场光谱曲线如图 8 所示，虚线为理想光谱分布，实线为实际光谱分布，计算得出该系统的光谱谱线弯曲为 0.09%，色畸变为 0.6%，可见该系统的谱线弯曲和色畸变都达到了设计要求。

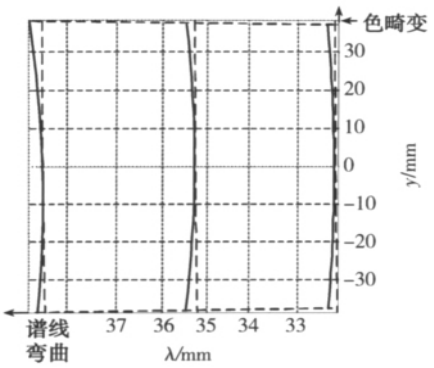


图 8　探测器接收到的成像光谱分布

Fig. 8　Imaging spectra received by detector

3.2　应用实例

利用所研制的凸面光栅成像光谱仪在室外对 1 m 远处花卉扫描得到的 550 nm 成像图及通过数据立方提取 E,F 两点的光谱曲线如图 9 所示。由图可见,E 点植被的光谱曲线在 550 nm 附近具有一个反射峰,在 650 nm 附近反射率下降,在 730 nm 附近反射率急剧上升;F 点植被的光谱曲线在蓝色附近吸收较强,在 650 nm 附近反射率明显上升。根据植被曲线光谱特征[20]可知,E 点光谱曲线符合健康的绿色植被光谱曲线特性,其对应物空间探测目标为健康的绿色植被;同理,F 点光谱曲线符合健康花卉的光谱曲线特性,其对应的物空间探测目标为健康的淡红色花朵。

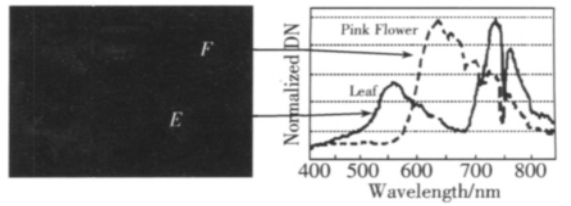


图 9　室外花卉的 550 nm(左)成像图和 E,F 两点的光谱曲线

Fig. 9　Image of flower at 550 nm(left) and spectra of E and F(right)

4　结　论

本文设计了一种以自主研发的凸面光栅作为核心分光元件的便携式凸面光栅成像光谱仪,经过测试其光谱分辨率为 2.4 nm,光谱谱线弯曲为 0.1%,色畸变为 0.6%,体积为 209 mm×199 mm×110 mm。同时,使用该凸面光栅成像光谱仪进行了室外花卉健康状况检测,得到了理想的成像光谱数据。以上结果表明:使用自主研发的凸面光栅作为核心分光元件的凸面光栅成像光谱仪成像质量好、体积小、质量轻,具有广阔的应用前景,该仪器的成功研制为将来成像光谱仪的实际应用奠定了基础。

参考文献:

[1] MOUROULIS P, THOMAS D A. *Trade Studies in Multi/hyperspectral Imaging Systems Final Report*[R]. USA,1998.

[2] FISHER J, ANTONIADES J A, ROLLINS C, *et al*.. Hyperspectral imaging sensor for the coastal environment[J]. *SPIE*, 1998, 3482:179-186.

[3] FISHER J, BAUMBACK M M, BOWLES J H, *et al*.. Comparsion of low-cost hyperspectral sensor [J]. *SPIE*, 1998, 3428:23-30.

[4] GUMBEL H. System considerations of hyper/ultra spectroradiometric sensors[J]. *SPIE*, 1996, 2821: 138-170.

[5] KWO D, LAWERECE G, CHRISP M. Design of a grating spectrometer from a 1∶1 Offner mirror system[J]. *SPIE*, 1984, 818:275-279.

[6] CHRISP M P. *Convex diffracting grating imaging spectrometer*: U. S. Patent 5,880,834[P]. 1999.

[7] LOBB D R. Imaging spectrometers using concentric optics[J]. *SPIE*, 1997, 3118: 339-347.

[8] REININGER F. VIRTIS: Visible Infrared Thermal Imaging Spectrometer for the Rosetta mission[J]. *SPIE*,1996, 2819: 66-77.

[9] DAVIS C O, KAPPUS M E, BOWLES J H, *et al*.. Calibration, characterization, and first results with the Ocean PHILIS hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 1999, 3753: 160-168.

[10] FOLKMAN M A, PEARI M J, LIAO I B, *et al*.. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization and calibration [J]. *SPIE*, 2001, 4151: 40-51.

[11] WIISON T H, DAVIS C O. Hyperspectral remote sensing technology(HRST) program and the naval darth map bbserver(NEM) satellite[J]. *SPIE*,

1998，3437：2-11.

[12] FIETCHER P A. Image acquisition planning for the CHRIS sensor onboard PROBA[J]. *SPIE*，2004，5546：141-150.

[13] **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
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*，2005，13(6)：650-657. (in Chinese)

[14] **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.
ZHENG Y Q，WANG H，WANG Y F. Selection and design of systems for spaceborne hyperspectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*，2009，17(11)：2629-2637. (in Chinese)

[15] **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.
HUANG Y SH，NI ZH J，ZHUANG S L. Research of the concentric optical system of grating spectrometer[J]. *Optical Instruments*，2005，27(6)：38-42. (in Chinese)

[16] **黄元申，陈家璧. 凸面光栅** Offner **结构成像光谱仪的傅里叶分析[J]. 光学仪器**，2007，29(6)：40-43.
HUANG Y SH，CHEN J B. Fourier analysis of Offner imaging spectrometer composed of a convex grating[J]. *Optical Instruments*，2007，29(6)：40-43. (in Chinese)

[17] FISHER J，WELCH W C. Survey and analysis of Fore-Optics for hyperspectral imaging systems[J]. *SPIE*，2006，6206：62062R.

[18] MOUROULIS P，HARTLEY F T，MULLER R E，*et al.*. Grating fabrication through X-ray lithography[J]. *SPIE*，2003，5173：108-114.

[19] WILSON D W，MAKER P D，MULLER R E，*et al.*. Recent advances in blazed grating fabrication by electron-beam lithography[J]. *SPIE*，2003，5173：115-126.

[20] **童庆禧，张兵，郑兰芬. 高光谱遥感[M]. 北京：高等教育出版社**. 2006.
TONG Q X，ZHANG B，ZHENG L F. *Hyperspectral Remote Sensing*[M]. Beijing：Higher Education Press，2006. (in Chinese)

作者简介：



刘玉娟(1984－)，**女，山东泰安人，博士研究生，主要从事成像光谱仪设计、装调及光谱数据处理技术的研究**。E-mail：xuliuyujuan@163.com



崔继承(1976－)，**男，吉林长春人，博士研究生，副研究员，主要从事光学设计理论及光谱仪器设计的研究**。E-mail：jicheng_cui@yahoo.com.cn



巴音贺希格(1962－)，**男，内蒙古鄂尔多斯人，博士，研究员，博士生导师，主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究**。E-mail：bayin888@sina.com



齐向东(1965－)，**男，吉林辽源人，研究员，博士生导师，主要从事光栅刻划机研究及衍射光栅研制**。E-mail：chinagrating@263.net



陈少杰(1985－)，**女，黑龙江宁安人，博士研究生，助理研究员，主要从事光谱仪器研发及光谱信息处理技术的研究**。E-mail：shaojie.csj@gmail.com

导师简介：



唐玉国(1967－)，**男，吉林人，博士，研究员，博士生导师，主要从事光谱仪器及医用光谱技术的研究**。E-mail：tangyg@yiliaoyiqi.com