

文章编号 1004-924X(2017)增-0001-06

凹面光栅同心光谱仪的物像面转移式设计 设计与对比分析

刘玉娟¹, 崔继承², 张 刘¹, 张天瑜^{1*}, 林 君¹

- (1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:凹面光栅同心光谱仪中同心系统的物面和像面位于同一平面,且物像垂轴距离仅有几毫米,限制了实际系统中焦平面探测器和前置成像系统的摆放。为了解决此问题,在光学系统中引入平面反射镜将光线偏折,实现物面和像面的分离。根据平面反射镜偏转光线不同,设计了两种改进式凹面光栅同心光谱仪:物面转移式与像面转移式,利用仿真软件对这两种改进的光学系统设计进行了对比分析。结果表明:两种设计均能实现物面与像面的分离,分离距离均大于16 mm,且像差均得到较好的控制,在400~800 nm内全波段波像差曲线几乎为0,满足实际应用中低像差、高成像质量、物像面分离的要求,有效解决了器件摆放问题。

关键词:光学设计;光栅光谱仪;凹面光栅;同心;物面转移;像面转移

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0001

Design and analysis of concave grating concentric spectrometer with shifting object and image plane

LIU Yu-juan¹, CUI Ji-cheng², ZHANG Liu¹, ZHANG Tian-yu^{1*}, LIN Jun¹

- (1. College of Instrument Science & Electrical Engineering,
Jilin University, Changchun, 130026, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese
Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
* Corresponding author, E-mail: zty@jlu.edu.cn

Abstract: The object plane and image plane of concave grating concentric spectrometers are in the same plane, and the vertical axis distance between object and image is only a few millimeters, which limits the arrangement of focal plane detectors and front lens. In order to solve this problem, a plane mirror was introduced into the optical system to deflect the light, and the separation of the object surface and the image surface was realized. According to the deflection light, two improved concave grating concentric spectrometers with shift object plane or shift image plane were designed and then simulated by simulation software. The simulation results show that the two spectrometers can achieve the separation of object surface and image plane, the separation distance is greater than 16 mm, and the aberration

收稿日期:2017-05-28;修订日期:2017-06-11.

基金项目:国家自然科学基金项目资助(No. 41504135)

tions are also well controlled, within the 400—800 nm the aberration curve is almost zero. Those results meet the application requirements of low aberration, high image quality, image plane separation, which can effectively solve the problem of device arrangement.

Key words: optical design; optical grating spectrometer; concave grating; concentric; shift object plane; shift image plane

1 引言

高光谱成像技术起源于 20 世纪 80 年的军事遥感应用,该技术通过成像光谱仪获取探测目标的三维高光谱“数据立方体”,可对目标同时进行空间成像分析和光谱信息成分识别,弥补了传统成像技术不能进行成分分析和传统光谱技术不能获取空间信息的不足,并在遥感监测、环境普查、地质调查、矿物填图、航空航天探测等领域得到了广泛的应用^[1-7],是现代先进星载遥感探测的主要方法之一。

近年来,在海岸线资源勘查、海洋资源探测等特殊遥感领域,由于水面反射率较高,基于传统光栅分光结构的高光谱成像技术难以满足实际需求^[8-11],迫切需要同时具备高孔径、高分辨率的高光谱成像仪载荷。基于 Dyson 同心光学结构的凹面光栅同心光谱仪可以有效解决这一问题。Dyson 同心光学系统是 1959 年 J. Dyson 为校正光学系统像差提出的单放大倍率光学系统,该系统无初级像差、数值孔径高、结构简单、易于实现小型化,因此在显微镜、照相机以及干涉仪等光学设备上得到了重要的应用^[12]。凹面光栅同心分光结构数值孔径可高达 0.6,因此完全满足高孔径成像光谱仪的应用需求,在现代高性能的高光谱载荷中备受青睐。近年来,欧空局、美国喷气推进实验室等均成功研制了基于凹面光栅同心光谱仪的高光谱载荷,这些载荷在海洋探测、环境监控、资源勘查等诸多领域发挥了巨大作用^[13-19]。

凹面光栅同心光谱结构作为高光谱成像仪的核心部分,直接决定了仪器的光谱性能,为了实现“光学同心”,该结构的物面和像面重合为一个平面,且小型系统中物像的垂轴距离仅有几厘米,限制了焦平面探测器和前置成像系统的摆放,明显加大了系统设计与加工装配的难度,严重制约了凹面光栅同心光谱结构的发展和推广。本文对凹

面光栅同心光学结构进行了改进,提出了物面转移式与像面转移式两种结构形式,并利用仿真软件对这两种改进的光学系统进行了对比分析,有效解决了系统物像面的安置问题。

2 凹面光栅同心分光系统原理

凹面光栅同心分光结构以 Dyson 同心光学结构为原型,该结构仅由透镜和凹面光栅两个光学元件组成,具有 3 个光学表面:平凸透镜的凸球面、平凸透镜的平面、凹面光栅的凹球面。如图 1 所示,两个光学球面的球心重合为一点 C,由物点 O 发出的入射光线经折射率为 n 的透镜到达曲率半径为 R 、刻线密度为 N 的凹面光栅。经凹面光栅衍射后,衍射光线经透镜曲率半径为 r 表面折射后成像在 I 点。

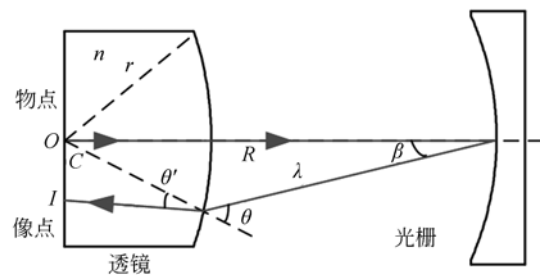


图 1 凹面光栅同心光谱仪结构图

Fig. 1 Schematic of concave grating concentric spectrometer

根据几何光学成像理论,当凹面光栅同心光谱仪的物点 O 位于公共球心 C 点时,该同心光学结构无初级像差、数值孔径高(>0.6)、成像清晰,但此时与物点 O 共轭的像点 I 也位于入射平面内。此时,物点 O 发出的入射光线沿着光轴到达凹面光栅的入射角为零,设 β 为入射光 λ 经衍射后的衍射角, θ 为衍射光线到达平凸透镜的入射角,其折射角为 θ' ,像点 I 到物点 O 的距离为 l 。由于光栅入射角为零,光栅方程为:

$$\sin \beta = m\lambda N. \quad (1)$$

由 Snell 定律得:

$$n \sin \theta' = \sin \theta. \quad (2)$$

根据正弦定理,得:

$$\frac{R}{\sin \theta} = \frac{r}{\sin \beta}, \quad (3)$$

$$l = \frac{\sin \theta'}{\cos(\theta - \theta' - \beta)} r. \quad (4)$$

令 $\omega = \theta - \theta' - \beta$, 则有:

$$l = \frac{1}{\cos \omega} r \sin \theta'. \quad (5)$$

由式(5)可知,物像点之间的垂轴距离 l 较小。根据像差理论,物点、像点的位置偏移会破坏系统的对称性,导致系统的像差显著增加^[20],这就要求仪器装配中必须严格同心,否则会产生严重像差从而影响系统性能,这大大提高了物面、像面的机械结构架设计及装调难度。

3 同心凹面光栅光谱仪的物像面转移式设计

平面反射镜简称平面镜,它是能成完善像的最简单的光学元件,即系统中引入平面镜能够改变光路方向但不会引入附加的像差,因此在同心凹面光栅光谱仪系统中,采用平面镜将光线偏折可以在不引入附加像差的情况下有效解决物面像面的摆放问题。根据平面镜所要偏转的光束是物体发出光束还是成像光束的不同,平面镜可实现物面或像面的转移。

3.1 物面转移式设计原理

物面转移式设计即将平面镜置于物体发射光束中,通过偏折物体发射光束,实现物面以后光路的转移,如图 2 所示。若平面镜与光轴的夹角为 α ,与物面的轴向距离为 d ,则物点 O 经平面镜反射后其像点 O' 与中心 C 重合,像点 I 离中心 C 的距离为 l 。

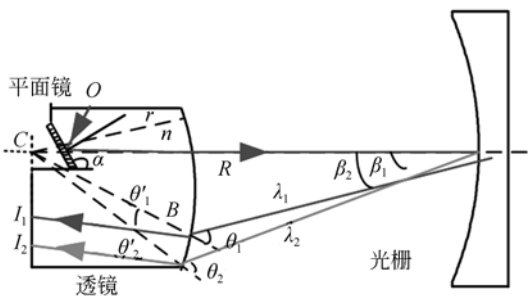


图 2 同心凹面光栅光谱仪物面转移式原理图

Fig. 2 Schematic principle of concave grating concentric spectrometer with folding objecting light

α ,与原物面的轴向距离为 d ,则物点 O 经平面镜反射后其像点 O' 与中心 C 重合,像点 I 离中心 C 的距离为 l 。

3.2 像面转移式设计原理

像面转移式设计即将平面镜置于成像光束中,通过偏折成像光束实现像面转移,如图 3 所示,若平面反射镜与光轴的夹角为 α ,与物面的轴向距离为 d ,像点 I 经平面镜反射后其像点分别为 I' ,设像点 I' 离中心 C 的距离为 l' 。

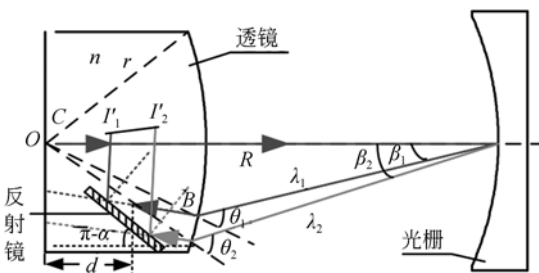


图 3 同心凹面光栅光谱仪像面转移原理图

Fig. 3 Schematic principle of concave grating concentric spectrometer with folding imaging light

3.3 两种折叠式设计结果对比

凹面光栅同心光谱仪的结构参数如表 1 所示,由式(1)~式(5)可得同心光谱仪的物像距离为 9.5 mm,器件摆放难度较大。分别利用两种折叠式设计对凹面光栅同心光谱仪进行模拟和结果分析。

表 1 凹面光栅同心光谱仪的结构参数

Tab. 1 Parameters of concave grating concentric spectrometer

参数	数值
光谱范围/nm	400~800
设计波长/nm	600
凸球面曲率半径/mm	46
凹球面曲率半径/mm	132
光栅刻线密度/(g·mm ⁻¹)	180

如图 4 所示为利用仿真软件模拟物面转移式和像面转移式凹面光栅同心光谱仪的光路结构对比。其中,图 4(a)为物面转移式凹面光栅同心光谱仪的光路设计,所需平面反射镜尺寸为 16 mm,实现物像面分离距离为 28.2 mm;图 4(b)为像面

转移式凹面光栅同心光谱仪的光路设计,所需平面反射镜尺寸为 26 mm,实现物像面分离距离为 16.3 mm。由图可见,两种转移式设计均实现了物面和像面的分离,且整体光学结构外形均由原来的直线型变为“L”形。物面转移式设计中物面和像面的分离距离较大,为了避免光线遮拦,平面镜需尽量靠近物点,因此平面镜作用面积即实际尺寸较小;像面转移式设计中物面和像面的分离

距离较小,由于平面镜置于色散后的成像光束中,作用面积较大。

如图 5 所示为利用光学仿真软件分析物面转移式设计和像面转移式设计时凹面光栅同心光谱仪的全视场全波段像差曲线对比。由图可见,两种设计的像差均得到了较好控制。另外,像面转移式设计由于可以将像面位置相对灵活调整,其像差可以根据实际需要权衡分配。

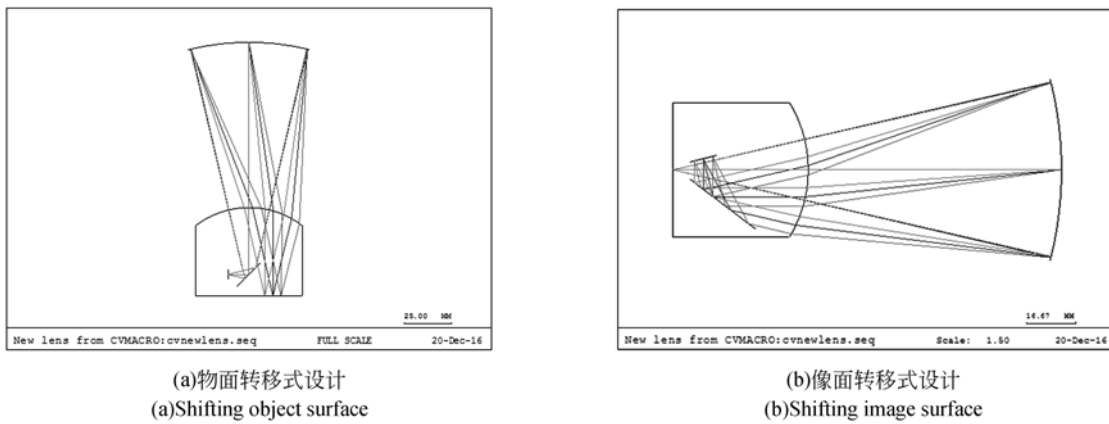


图 4 物面转移式、像面转移式凹面光栅同心光谱仪的光路

Fig. 4 Optical paths of concave grating concentric spectrometer with shifting object and image surfaces respectively

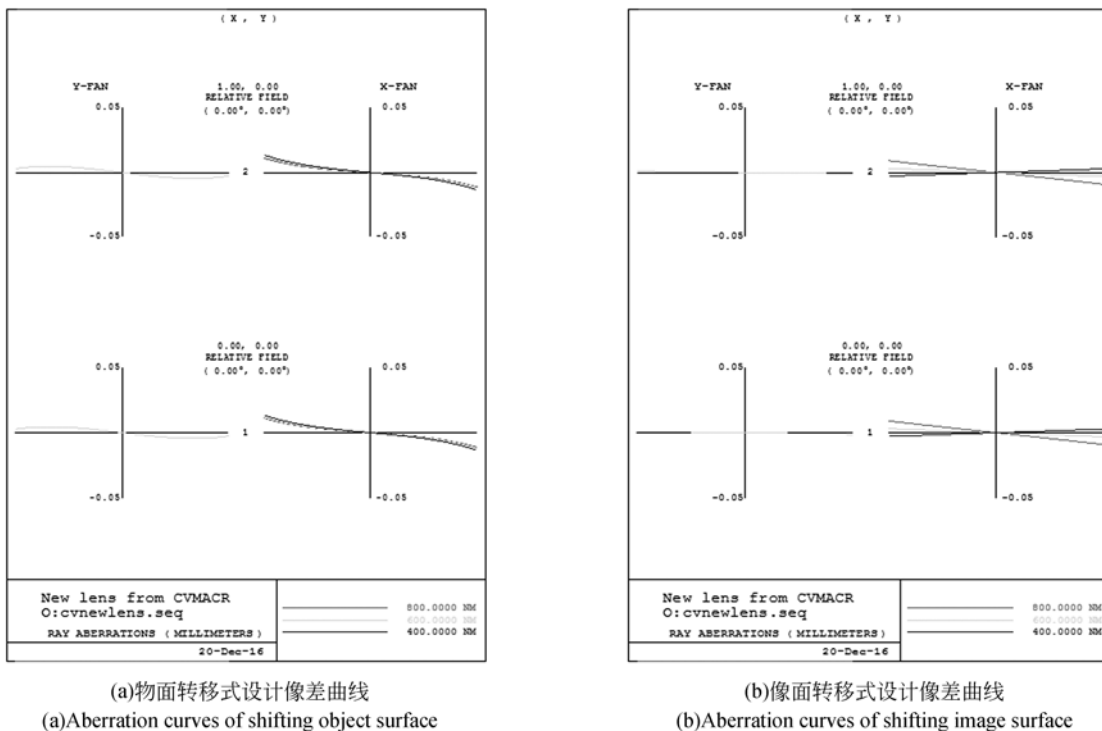


图 5 物面转移式、像面转移式凹面光栅同心光谱仪全波段全视场像差曲线

Fig. 5 Aberration curves of concave grating concentric spectrometer in whole field and waveband

如图 6 所示为利用光学仿真软件分析物面转移式和像面转移式凹面光栅同心光谱仪的全波段中心视场和边缘视场的全波段点列斑分布对比图。由图 6 可知,两种设计点列斑分布都比较均匀,边界清晰,像面转移式设计由于可以将像面位置灵活调整,其点列斑相对较小。

由图 4~图 6 可知:凹面光栅同心光谱仪两种折叠式设计的光学像差均控制得较好。物面转

移式设计的物面像面分离距离相对较大,可根据实际探测器的尺寸调整反射镜的位置与夹角,平面镜作用面相对较小;像面转移式设计的物面像面分离距离相对较小,且平面镜置于色散后的成像光束中其作用面较大,该设计中通过改变像面的倾角能对系统全波段像差进行合理分配。两种形式的光谱仪在全波段全视场的点列斑分布大小均匀、边界清晰,完全满足设计系统的实际应用要求。

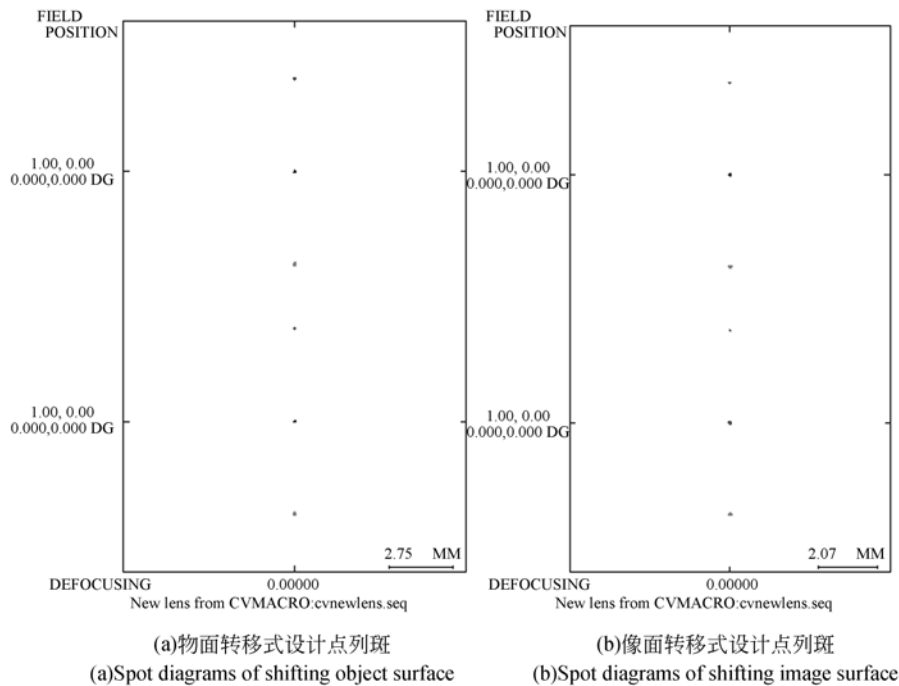


图 6 物面转移式、像面转移式凹面光栅同心光谱仪的中心波长点列斑

Fig. 6 Spot diagrams of concave grating concentric spectrometer at 600 nm

4 结 论

凹面光栅同心光谱仪像差小、孔径高、结构简单紧凑,有效地解决了传统光栅光谱仪孔径与尺寸之间的矛盾,但系统的物面和像面位于同一平面,且小型系统中物像垂轴距离仅有几厘米,限制了焦平面探测器和前置成像系统的摆放。为了有效解决器件的摆放问题,本文根据平面镜位置不同设计了两种物面像面分离方

法,并对两种方法进行了软件仿真和模拟对比分析。结果表明:物面转移式设计平面镜尺寸小,物像面分离距离大;像面转移式设计平面镜尺寸大,物像面分离距离小;通过调整像面夹角可以实现像差的全视场均衡分配。从两种设计的像差及点列斑可得两种设计均满足实际需求。实际中可根据具体应用需求、探测器尺寸和光学元件的加工难度等选择物面像面分离方式。该研究对推进凹面光栅同心光谱仪的开发进程具有重要意义。

参考文献:

- [1] LOBB D R. Imaging spectrometers using concentric optics[J]. *SPIE*, 1997, 3118: 339-347.
- [2] BAUDIN G, BESSUDO R, BEZY J L, *et al.*. Medium resolution imaging spectrometer (MERIS), in Future European and Japanese Remote-Sensing Sensors and Programs[J]. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1991, 1490:102-113.
- [3] MOUROULIS P, GREEN R O, WILSON D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2008, 16:9087-9095.
- [4] ROBERT O, GREEN, MICHAEL L, *et al.*. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1998, 65:227-248.
- [5] FRANCESCO D, JENS N, BENJAMIN K, *et al.*. Improving radiometry of imaging spectrometers by using programmable spectral regions of interest[J]. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64: 631-639.
- [6] PAINTER T H, ROBERTS D A, GREEN R O, *et al.*. The effect of grain size on spectral mixture analysis of snow-covered area from AVIRIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65:320-332.
- [7] MOUROULIS P. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2008, 16: 9087-9095.
- [8] MOUROULIS P, THOMADS D A. Spectral response evaluation and computation for pushbroom imaging spectrometers[J]. *SPIE*, 2007, 66670G: 1-12.
- [9] MOUROULI P. Grating fabrication through X-ray lithography[J]. *SPIE*, 2003, 5173:108-114.
- [10] ALEXANDER F GOETZ H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the earth :A personal view, remote sensing of environment [J]. 2009, 113:5-16.
- [11] DYSON J. Unit magnification optical system without Seidel aberrations [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, 49: 713-716.
- [12] NAMIOKA T. Theory of the concave grating I[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, 49(5): 446-460.
- [13] MERTZ L. Concentric spectrographs[J]. *Appl. Opt.*, 1977, 16:3122-3124.
- [14] LOBB D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers [J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33, 2648-2658.
- [15] LOBB D R. Imaging spectrometers using concentric optics[J]. *SPIE*, 1997, 3118, 339-347.
- [16] FISHER J, ANTONIADES J A, ROLLINS C, *et al.*. Hyperspectral imaging sensor for the coastal environment[J]. *SPIE*, 1998, 3482:179-186.
- [17] MOUROULIS P, GREEN R O, CHRIEN T G. Design of pushbroom imaging spectrometer for optimum recovery of spectroscopic and spatial information[J]. *Applied Optics*, 2000, 13:39-44.
- [18] FRANCESCO D, JENS N, BENJAMIN K, *et al.*. Improving radiometry of imaging spectrometers by using programmable spectral regions of interest[J]. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64:631-639.
- [19] 吴国安. 光谱仪器设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- WU G A. *Design of Spectrometer* [M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)
- [20] LIU Y G, WANG C M, LIN J. Optimal designing of light folding imaging spectrometer based on dyson concentric system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 32(7):2286-2290.

作者简介:



刘玉娟 (1984—), 女, 山东泰安人, 博士, 讲师, 2012 年于中科院长春光机所获得光学工程博士学位, 主要从事非成像光学仪器设计、调试及测试方面的研究。E-mail: xuliuyujuan@163.com

通讯作者:



张天瑜 (1984—), 男, 吉林长春人, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感检测技术的研究。E-mail: zty@jlu.edu.cn