文章编号 1004-924X(2017)12-3001-11

Offner 成像光谱仪的消像差技术

赵美红[1,2],李文昊[1*],巴音贺希格[1],吕 强[1,2]

(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.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:介绍了基于同心结构的 Offner 成像光谱仪光学系统的工作原理、结构特点及优势,综述了 Offner 型成像光谱仪在国内外的研究进展。较详细地介绍了国内外目前常用的三种消像差方式,即通过改变光学元件装调结构实现消像差,基于单光栅像差理论的解析方法进行消像差以及通过设计凸面全息光栅来提高光谱图像的分辨率。文中总结了 Offner 成像光谱仪存在的关键问题及发展趋势,强调该系统需要解决的问题的是消除系统像差,提高系统光谱分辨率、空间分辨率和对弱信号的探测能力,其发展方向为更高的分辨率和探测能力以及系统的小型化和轻量化。基于对 Offner 成像光谱仪的研究,文中提出了一种从凸面全息光栅与光谱仪一体化设计的角度进行消像差的思路。

关 键 词:Offner 成像系统;成像光谱仪;像差校正;凸面全息光栅

中图分类号:TH744.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20172512.3001

Aberration correction technique of Offner imaging spectrometer

ZHAO Mei-hong[1,2], LI Wen-hao[1*], BAYANHESHIG[1], LÜ Qiang[1,2]

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

Abstract: The working principle, structure characteristics and advantages of the optical system in an Offner imaging spectrometer are introduced based on a concentric structure. The research and development of the Offner imaging spectrometer are overviewed. It describes in detail the commonly used three kinds of correction aberration ways, namely by changing optical element adjustable structure to correct the aberration, by aberration theory analysis based on single grating to correct the aberration and by design of a convex holographic grating to improve the resolution of the spectral image. Then, it summarizes the key problems of the Offner imaging spectrometer and emphasizes some of them should be solved in further, such as correction of the system aberration, improvement of spectral resolution and spatial resolution and enhancement of detecting weak signals. Finally, it points out that the development trend of the system is higher resolution, better detecting capability and more compact structure. Based on the research of the Offner imaging spectrometer, this paper proposes an approach

收稿日期:2017-10-26;**修订日期**:2017-11-13.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20170519019JH);吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项(No. 2017SYHZ0025);长春市科技计划资助项目(No. 17SS025)

to correct aberration based on the integrated design of convex holographic grating and spectrometer.
Key words: Offner concentric structure; imaging spectrometer; aberrations; convex grating

1 引　言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代[1]开始在多光谱成像技术的基础上发展起来的新一代空间光学遥感仪器，标志着遥感技术的进步与发展。它能够以高光谱分辨率同时获取被探测目标的空间信息和光谱信息，其工作波段宽、分辨率高，一般覆盖 0.4～1.0 μm，地面像元分辨力从几米至几十米，光谱分辨率从几纳米至几十纳米，广泛应用于遥感领域，即在大气、陆地和海洋观测以及农林、水土、矿产资源调查等领域具有巨大的应用价值和广阔的发展前景[2-17]。

随着光学遥感技术的发展及其在航空航天领域越来越广泛的应用，对于成像光谱仪的技术指标，如相对孔径、光谱分辨率、空间分辨率和对弱信号的探测能力要求越来越高[18-24]；同时，为了适应无人机等新型遥感平台[25-27]的快速发展和搭载需求，小型化、轻量化日渐成为机载和星载成像光谱仪的另一个发展趋势。Offner 型成像光谱仪结构简单紧凑，满足轻量化需求；其应用受材料限制和环境影响很小[28-30]，易实现焦面稳定性和光谱稳定性，适用于空间环境，而这些优点是其他分光系统所不具备的。

近年来，世界各国都在积极开展空间探测研究，Offner 成像光谱仪已成为成像光谱领域的研究热点。其中，美国掌握了凸面闪耀光栅的关键技术[31]，在 Offner 成像光谱仪的研制方面占据优势，而我国对于消像差 Offner 成像光谱仪的研究还停留在实验室阶段。目前，国内市场已被美国 Headwall 公司和芬兰 Specim 公司等外国公司所垄断。为打破国外垄断，突破相关核心技术，形成具有知识产权的相关产品，对消像差的 Offner 成像光谱仪的研究尤为重要。

Offner 成像光谱仪的分光系统为基于凸面光栅分光的同心结构，该结构有很好的对称性，Seidel 像差[32-35]得到消除，具有良好的光学性能，即相对孔径大、分辨率高、像差校正能力强、结构简单紧凑、体积小等。但是凸面光栅的引入，使得系统的完全对称性遭到破坏，导致像散和彗差[36]。因此，消除像散和彗差，以更好地满足实际应用需求，对凸面光栅成像光谱仪消像差的理论、结构与设计方法的研究具有重要意义。

2 Offner 成像光谱仪的构成及工作原理

2.1 Offner 成像光谱仪的构成

Offner 成像光谱仪由前置望远系统和光谱分光系统组成，其中光谱分光系统是从 Offner 双镜三反射系统演变而来的[30]，将其中的第二反射镜改为凸面光栅，既保留了 Offner 系统对称消像差的特点又能实现光谱分离，因此，该结构也称为 Offner 成像光谱仪，其结构如图 1 所示。

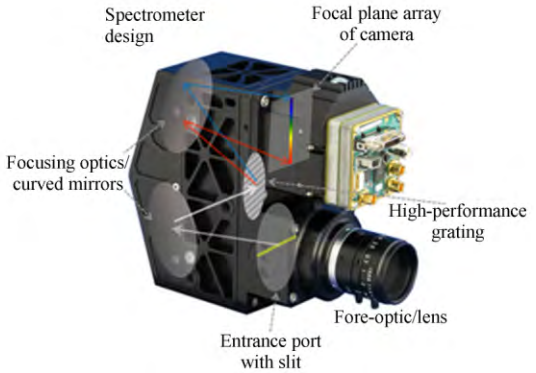


图 1　Offner 成像光谱仪结构图

Fig. 1　Schematic diagram of Offner imaging spetrometer

2.2 Offner 成像光谱仪的工作原理

该系统的基本工作原理[37-38]如图 2 所示。沿狭缝方向的探测目标条带经过前置望远镜系统成像在狭缝上，后经 Offner 分光系统色散形成光谱像并被探测器 CCD 接收。通过空间连续推扫的方式获得目标图像的数据立方体，从而可以对目标进行空间分析与光谱分析。

在该系统中，Offner 分光系统由两个凹面反射镜和一块凸面光栅构成，且凸面光栅位于光学系统的孔径光阑位置。该结构是一个单位放大率的同心光学系统并采用罗兰圆配置[37,39-41]，具有结构简单紧凑、光学加工相对容易、像差校正能力

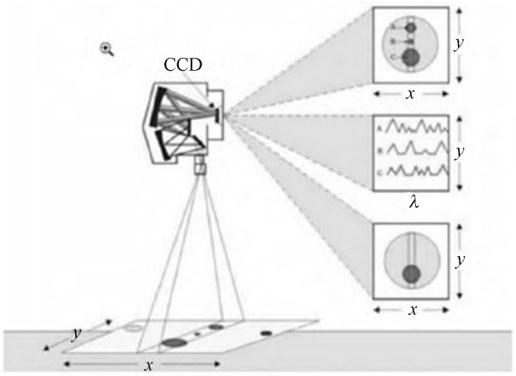


图 2　Offner 成像光谱仪的工作原理图

Fig. 2　Principle diagram of Offner imaging spetrometer

强的特点，其原理结构如图 3 所示。

Offner 分光系统中凹面反射镜 M1、M2 和凸面光栅 G 的曲率中心重合于轴上点 C，物面上点 O 发出的光线经过 M_1 反射到凸面光栅 G 上，后经光栅 G 衍射到 M_2 上，最后经 M_2 聚焦成像至像点 I。对于主光线，物点 O 和像点 I 关于 C 点对称，且三点位于同一平面内。由于孔径光阑位于凸面光栅 G 上，整个系统为远心系统，存在一个细环形视场，在该视场上主光线的入射和出射光线互相平行并垂直于物像平面，近似满足同心光学系统的理想成像条件；而其余的入射光线和出射光线不再平行，在近轴条件下，这种光线不平行带来的像差很小[26,42]。凸面光栅 G 在 Offner 分光系统中的色散作用，使完善的成像条件遭到破坏，系统虽保留了原有的优良成像性能，但也引入了像散与彗差。因此，为了满足实际应用中更高的需求，需要对 Offner 成像光谱仪进行消像差设计。

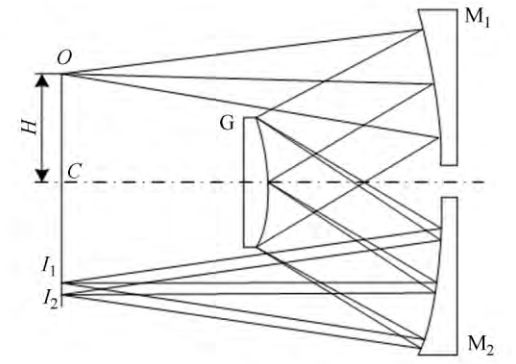


图 3　Offner 光谱成像系统

Fig. 3　Schematic diagram of Offner imaging system

3　国内外研究进展

自 1987 年 D. Kwo 等[5] 首次提出基于 Offner 同心分光结构的凸面光栅成像光谱仪以来，各国对 Offner 成像光谱仪展开了一系列研究，其中，美国在该领域处于领先地位。

目前，Offner 成像光谱仪的研究热点主要在于消除光学系统的像散与彗差等残余像差，消像差方式主要有三种：通过改变光学元件装调结构来实现消像差，基于单光栅像差理论的解析方法进行消像差，通过设计凸面光栅来提高光谱像的分辨率。

3.1　改变光学元件装调结构的消像差设计方法

3.1.1　非共面结构的消像差 Offner 成像光谱仪

2007 年，LUCKE[43] 提出了一种基于非共面结构的消像差 Offner 成像光谱系统，该系统为平面外色散，一个短狭缝系统就可以使光线色散在所谓最佳成像圆附近而得到像质较好的光谱像。该结构关于光轴对称，遵循最佳成像圆理论(BIC)，即在以系统中心为圆心、以 H_0 为半径的圆上的任意物点将成像在同一成像圆上，且像点、物点关于光轴对称。

如图 4 所示，图中 H_0 为物点到光轴的距离，R_1，R_2 分别为主镜和凸面光栅的曲率半径。其中，H_0 满足：

$$R_2 \approx \frac{R_1}{2}\left(1+\frac{H_0^2}{2R_1^2}\right) \Leftrightarrow R_2 = \frac{R_1}{2\sqrt{1-H_0^2/R_1^2}}, \tag{1}$$

$$\frac{H_0}{R_2} \approx \frac{1}{F}, \tag{2}$$

上述两式满足 $R_2 = R_1/2$，F 为系统 f 数。随着物点、像点远离最佳成像圆，系统的成像质量会下降，设计时需保证物点及其光谱像尽量靠近最佳成像圆。因此，在非共面结构中，短狭缝系统能获得较好的像质。

图 5(a)为共面结构的 Offner 成像光谱仪，其结构中狭缝放置位置与最佳成像圆相切，光谱像成像在最佳成像圆之外；图 5(b)为非共面结构的 Offner 成像光谱仪，同样是基于 Offner 结构，由于结构中狭缝放置位置与最佳成像圆垂直，所以与共面结构的差别在于入射面与衍射面不共面，整个光谱像都位于最佳成像圆上，因此，该结构仅适用于短狭缝系统。

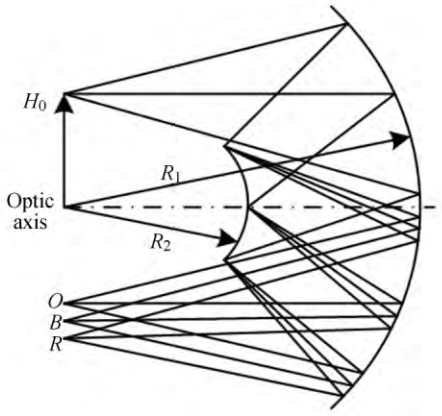
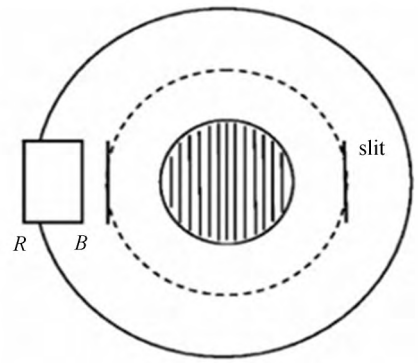


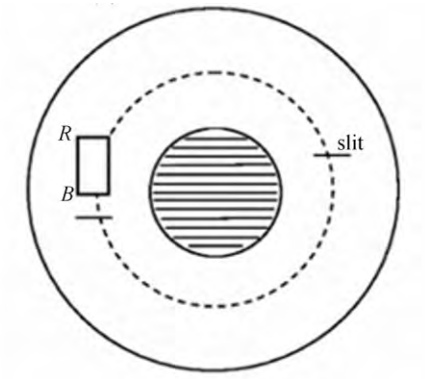
图 4　消像差 Offner 成像光谱仪

Fig. 4　Schematic diagram of Offner imaging spectrometer for eliminating aberration



(a) **共面结构**

(a) In-plane configuration



(b) **非共面结构**

(b) Out-of-plane configuration

图 5　沿光轴视角的 Offner 成像光谱仪结构

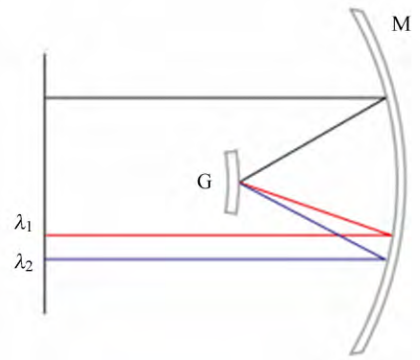
Fig. 5　Schematic view of Offner spectrometer along optical axis

2009 年至 2011 年[44-46]间，PRIETO-BLANCO 等人对这种结构展开进一步研究，提出了入射面与衍射面正交的非共面 Offner 结构，以及一般情况下非共面 Offner 结构光谱仪的设计方法，并基于系统光程差理论对像差校正过程进行了分析，为双镜或三镜非共面 Offner 型成像光谱仪的设计提供了理论指导。但是该设计的集光能力有限，仅适用短狭缝成像，难以应用于在空间成像中。

3.1.2　带有负像散校正透镜的消像差 Offner 成像光谱仪

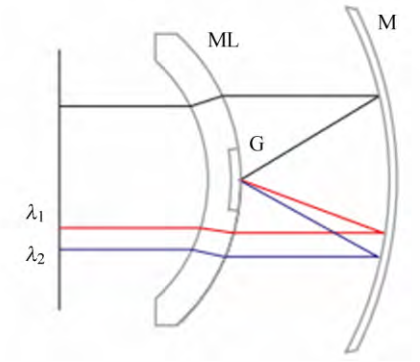
2014 年，PRIETO-BLANCO 等人[47]提出了一种在凸面光栅处加入一个同心且带有负像散的校正弯月透镜进行消像差的方法。他们分析并设计出具有两个最佳成像圆的 Offner 成像光谱系统，而且充分分析了该设计方法在共面与非共面 Offner 结构中的应用，使这两种结构的优势得到了充分发挥，弥补了非共面结构在空间应用的不足。

图 6 所示为三种不同的光谱成像系统，其中图 6(a)为传统的 Offner 结构，图 6(b)和 6(c)分



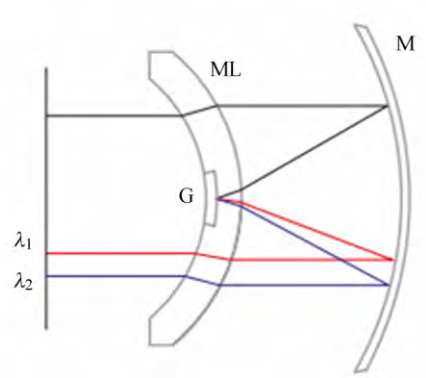
(a)**传统 Offner 结构**

(a) Typical Offner configuration



(b) **凸面光栅位于弯月透镜外表面的 Offner 结构**

(b) Offner configuration with diffraction grating disposed on outer surface of a meniscus lens (ML)

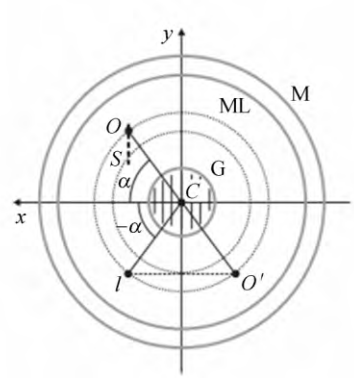


（c）凸面光栅位于弯月透镜内表面的 Offner 结构

（c）Offner configuration with diffraction grating disposed on inner surface of a meniscus lens (ML)

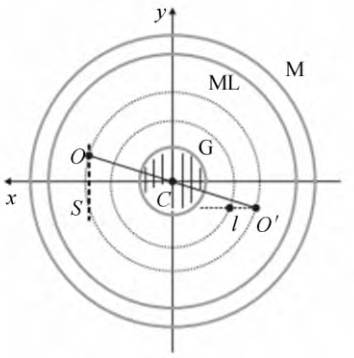
图 6　Offner 成像光谱系统

Fig. 6　Schematic diagram of Offner imaging system



（a）非共面结构

（a）Out-of-plane configuration



（b）共面结构

（b）In-plane configuration

图 7　加入弯月透镜的消像差 Offner 结构

Fig. 7　Configuration of aberration-corrected Offner with a meniscus lens (ML)

别为凸面光栅位于弯月透镜外表面与内表面的 Offner 结构。Offner 型成像光谱仪为单位放大的同心光学成像系统，这种系统只有在严格的远心条件下才会有较好的成像质量。

如图 6(a)所示，在该结构中有一个满足远心条件、高像质的细环形区域，该区域在以 h_0 为半径的最佳成像圆附近，h_0 满足：

$$\frac{R_{cc}^2}{4R_{CV}^2}+\frac{h_0^2}{R_{cc}^2}=1. \tag{3}$$

由式(3)可知，随着离轴量的增加，环形成像区域越来越细。为提高成像光谱系统的成像质量，系统要在一个较宽的区域内满足接近远心条件，加入弯月透镜进行像差校正[48-50]的设计方法可以使系统满足这种条件，由此设计出的 Offner 结构如图 7 所示。其中，图 7(a)只适用于非共面结构，以避免光谱像与狭缝发生重叠；图 7(b)则适用于共面结构，该情况下光谱与狭缝不会重叠。这种结构可在满足远心条件的点上实现谱线弯曲与谱带弯曲的消除，且能得到 f 数较小以及空间分辨率与光谱分辨率较高的光谱成像系统。

综上可知，自 1987 年 Offner 光谱成像系统发展以来，通过改变光学元件装调结构来消像差的手段主要有分裂凹面镜、调整狭缝位置和增加校正透镜等。其中，分裂凹面镜增加了消像差设计的自由度，通过调整两凹面镜的半径比以及倾斜角度可以消除部分像差，但是该方法的消像差效果不明显；调整狭缝位置得到的非共面结构只适用于短狭缝系统，不满足大孔径大视场的空间应用要求；增加校正透镜解决了很多问题，但是该方法增加了装调难度以及系统质量，而且在空间应用中易受温度的影响，因此也不是最佳选择。

3.2　单光栅像差理论的解析法

基于单光栅像差理论的解析法[51-55]在保证罗兰圆配置的条件下使子午和弧矢聚焦曲线在某一波长处相交或相切，由此来消除中心波长处的像散。2006 年，PRIETO-BLANCO 等人[40]从以像散面为参考波面的角度入手，提出了一种基于子午和弧矢聚焦曲线的简单设计方法。该方法在三元件同心和罗兰圆配置条件下，使子午和弧矢聚焦曲线在某一中心波长下相切，从而实现了特定波长处的像散消除。

图 8 所示为 PRIETO-BLANCO 等设计的 Offner 型成像光谱仪，物面位于图 8 的左上部，狭缝方向平行于 y 轴；凸面光栅位于 Offner 原始结

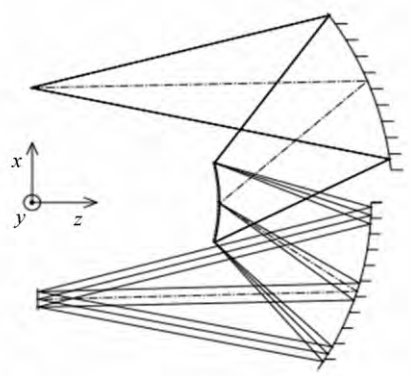


图 8　PRIETO-BLANCO 等设计的 Offner 型成像光谱仪

Fig. 8　Schematic diagram of Offner imaging system designed by PRIETO-BLANCO *et al*.

构的凸面镜位置，且光栅的沟槽方向也平行于 y 轴；点虚线为参考光线。成像时，子午像位于罗兰圆上，而弧矢像不在罗兰圆上，这使得像散成为 Offner 结构的主要像差。

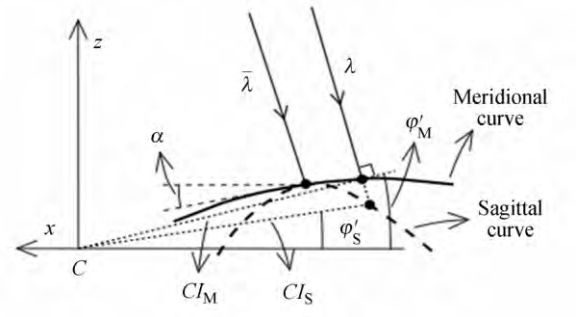


图 9　子午和弧矢聚焦曲线在给定波长处相切的示意图

Fig. 9　Schematic diagram of meridional curve being tangent to sagittal curve at appointed wavelength

该设计方法中，子午与弧矢像点在特定波长处重合，从而实现消像散，零像散条件如下：

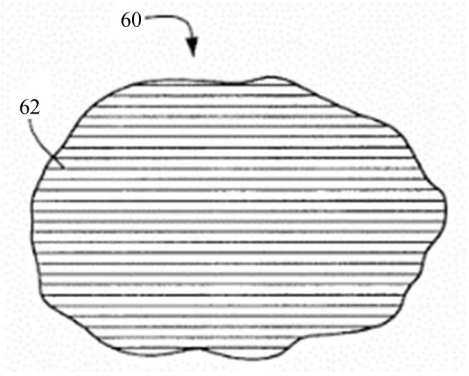
$$Astig = CI_S \sin(\varphi_M' - \varphi_S') = 0. \tag{4}$$

由于光栅的色散作用，在实际成像时，子午像和弧矢像是聚焦曲线而非像点，式(4)只能保证给定波长下两聚焦曲线的相交处为零像散。因此，PRIETO-BLANCO 提出了使子午和弧矢两聚焦曲线在特定波长处相切而消除像散的方法，如图 9 所示。该方法通过微分求解来确定消像散条件，从而确定初始结构参数，只能消除特定波长处的像散，忽略了系统中其他类型的像差，因此需要进一步的改进。

3.3　基于凸面全息光栅设计的消像差方法

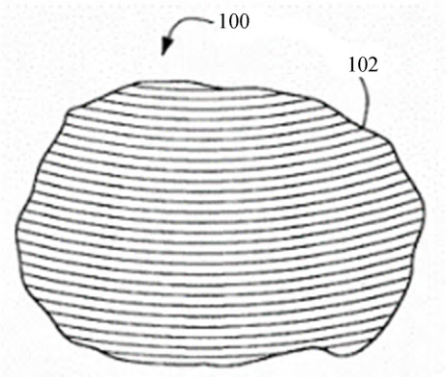
2001 年，Xiang Lian Qin 和 Mikes Thomas[57]用一块等间距曲线刻槽的凸面全息光栅(见图 10(b))代替等间距直线刻槽的凸面全息光栅(见图 10(a))，使视场像差得到了一定的矫正，提高了光谱仪的分辨率，扩大了凸面光栅成像光谱仪的应用范围。

在该设计中，等间距曲线刻槽凸面全息光栅的应用，为系统提供了相对于传统光学系统更多的光学能量，校正了光谱像的谱线弯曲，降低了系统像差，提高了光谱成像系统的空间分辨率和光谱分辨率。



(a) 直线刻槽的凸面光栅

(a) Convex grating with straight lines



(b) 曲线刻槽的凸面光栅

(b) Convex grating with curved lines

图 10　等间距刻槽的凸面全息光栅

Fig. 10　Convex grating with grooves evenly spaced apart

研究表明[56-58]，在满足相同指标的前提下，曲线刻槽的凸面全息光栅比直线刻槽的凸面全息光栅具有更高的衍射效率，所以前者的集光能力更强，而且曲线槽凸面光栅成像光谱仪的体积更小、像质更好。但是，Xiang Lian Qin 和 Mikes

Thomas 设计的曲线槽凸面光栅成像光谱仪只得到比直线槽系统更好的像质，并没有给出具体的凸面光栅消像差理论以及消像差凸面光栅成像光谱仪一体化设计结果。因此，依据凹面全息光栅的像差理论[59-61]，我们提出了消像差凸面全息光栅与光谱仪一体化设计以平衡系统像差的设计方法。

该设计方法以费马原理为依据，构建 Offner 成像光谱分光系统的像差理论模型，同时考虑凸面全息光栅记录时的波像差，参考凸面全息光栅像差平衡系统的像差，设计一款满足 Offner 成像光谱仪应用需求的像差校正凸面全息光栅。该光栅不仅能够达到理想的消像差效果，提高系统分辨率，还可以实现大孔径，且不会增加系统的额外负荷，同时可以补偿凹面反射镜的离轴像差、减小其离轴量，以更好地实现系统的轻小型化。

4　总结与展望

随着光学遥感技术的不断发展，具有高成像质量的光谱仪成为空间遥感的迫切需求。基于 Offner 同心结构的凸面全息光栅成像光谱仪由于具有相对孔径大、分辨率高、像差校正能力强的优点而受到广大研究人员的青睐。这种光谱仪结构简单、紧凑，满足轻量化需求；应用不受材料和环境限制，可以在整个光学光谱范围内实现色散；易实现焦面稳定性和光谱稳定性，更加适用于空间环境。但是，在 Offner 光谱分光系统中，凸面全息光栅的引入破坏了系统的完全对称性，引入了像散和彗差，影响系统成像质量。为了满足更高标准的应用需求，国内外学者对消像差的 Offner 成像光谱仪展开了一系列研究，旨在提高仪器的光谱分辨率、空间分辨率和对弱信号的探测能力，同时为满足不同平台的搭载需求，小型化成为 Offner 成像光谱仪另一个重要的发展趋势。

目前，Offner 成像光谱仪的消像差研究主要体现在以下几个方面：(1)改变系统装调结构的消像差设计，非共面结构的消像差成像光谱仪在最佳成像圆附近能得到较好像质，但是仅适用于短狭缝系统；(2)在成像光谱系统凸面光栅位置加有负像散校正透镜的设计，该方法增加了装调难度以及系统质量，而且其应用受温度影响；(3)单光栅像差理论的解析方法只能消除特定波长处的像散，忽略了系统中其他类型的像差，所以该设计还需要进一步改进。从凸面全息光栅与光谱仪一体化设计的角度进行消像差可以避免上述问题，该方法通过一体化设计仅从像差校正的凸面全息光栅的角度优化系统成像质量，简单有效，不会增加系统的额外负荷与装调难度，同时可通过凸面光栅的像差来补偿凹面反射镜的离轴像差，从而减小凹面反射镜的离轴量以更好地实现系统的轻小型化。

但是，目前对于像差校正的凸面全息光栅缺少相应的像差理论模型，因此，我们提出以凹面全息光栅像差理论为基础来构建凸面全息光栅像差理论的理念，并在设计 Offner 成像光谱仪时针对整个光谱分光系统的像差设计了相应的消像差凸面全息光栅，从而实现消像差 Offner 成像光谱仪的一体化设计。总之，从凸面全息光栅的角度研究 Offner 成像光谱仪将是其发展的一个重要趋势。未来随着基于 Offner 同心结构的消像差凸面全息光栅成像光谱仪研究的不断深入，上述问题会得到解决，Offner 成像光谱仪的光学性能会逐步趋于完善。具有高分辨率、大相对孔径、宽光谱波段、高探测能力的超轻小型凸面全息光栅成像光谱仪将广泛应用于大气、陆地和海洋观测，农林、水土、矿产资源调查，医疗、食品监测以及军事国防等与国民经济发展密切相关的各个领域。

参考文献：

[1] 杨增鹏，唐玉国，巴音贺希格，等. 棱镜-光栅组合色散型超光谱成像系统的优化设计[J]. 光学学报，2014，34(9)：0911003.
YANG Z P，TANG Y G，BAYANHESHIG，*et al*.. Optimization design method for optical system of prism-grating ultraspectral imaging spectrometers [J]. *Acta Optica Sinica*，2014，34(9)：0911003. (in Chinese)

[2] 杨晋，张锐，潘明忠，等. 大孔径面视场 PG 成像光谱仪的光学设计[J]. 光学 精密工程，2017，25(4)：867-874.
YANG J，ZHANG R，PAN M ZH，*et al*.. Optical design of PG imaging spectrometer with large aperture and surface field[J]. *Opt. Precision Eng.*，2017，25(4)：867-874. (in Chinese)

[3] 孙佳音. 基于 Dyson 结构的长波红外高光谱成像光谱仪光学系统研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2016.
SUN J Y. *Study on Optics System of Long-Wave Infrared Hyperspectral Imaging Spectrometer Base on Dyson Form*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

[4] 陈杨，王跃明. 大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与设计[J]. 光学学报，2013，33(2)：0222003.
CHEN Y, WANG Y M. Design and distortion characteristics analysis of the large-image-field off-axis three-mirror telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2):0222003. (in Chinese)

[5] KWO D, LAWRENCE G, CHRISP M. Design of a grating spectrometer from a 1∶1 Offner mirror system [J]. *SPIE*, 1987, 818: 275-279.

[6] COOK L G. High-resolution, all-reflective imaging spectrometer: US, 20050134844[P]. 2005-06-23.

[7] LIU Q, WU J H, ZHOU Y, *et al*.. The convex grating with high efficiency for hyperspectral remote sensing[J]. *SPIE*, 2016, 10156:101561k.

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

[9] SIMI C G, WINTER E M, WILLIAMS M M, *et al*.. Compact airborne spectral sensor (COMPASS) [J]. *SPIE*, 2001, 4381: 129-136.

[10] FISHER J, BAUMBACK M M, BOWLES J H, *et al*.. Comparison of low-cost hyperspectral sensors [J]. *SPIE*, 1998, 3438: 23-30.

[11] BERNARD S, GEORGES H, PIERRE P, *et al*.. Design and modelization of a convex grating for an hyperspectral imager of the Chandrayaan 2 instrument for the moon probe in the infrared[J]. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2016, 5(2): 69-74.

[12] ZHANG D, ZHENG Y Q. Hyperspectral imaging system for UAV[J]. *SPIE*, 2015, 9678:96780R.

[13] GREEN R O, PIETERS C, MOUROULIS P, *et al*.. Moon mineralogy mapper imaging spectrometer science measurements [C]. *Proceedings of 2008 IEEE Aerospace Conference*, *IEEE*, 2008: 1-5.

[14] DAVIS C O, BOWLES J, LEATHERS R A, *et al*.. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. *Optics Express*, 2002, 10(4): 210-221.

[15] MOUROULIS P, GREEN R O, WILSON D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 9087-9096.

[16] MOUROULIS P Z, MCKERNS M M. Pushbroom imaging spectrometer with high spectroscopic data fidelity: experimental demonstration[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(3): 808-816.

[17] 汪逸群，颜昌翔，苗春安. 星载高分辨率超光谱成像仪分光方式的选择[J]. 中国光学与应用光学，2009，2(4)：304-308.
WANG Y Q, YAN CH X, MIAO CH A. Choice of spectral-splitting modes in space-borne hyperspectral imager[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(4): 304-308. (in Chinese)

[18] 薛庆生，曹佃生，于向阳. 新型大相对孔径 Schwarzschild 光谱成像系统设计[J]. 中国激光，2014，41(1)：0116001.
XUE Q SH, CAO D SH, YU X Y. Optical design of neotype Schwarzschild spectral imaging system with a large relative aperture[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0116001. (in Chinese)

[19] 薛庆生，林冠宇，宋克非. 星载大视场短波红外成像光谱仪光学设计[J]. 光子学报，2011，40(5)：673-678.
XUE Q SH, LIN G Y, SONG K F. Optical design of spaceborne shortwave infrared imaging spectrometer with wide field of view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(5): 673-678. (in Chinese)

[20] 薛庆生. 星载高分辨力、大视场高光谱成像仪光学设计[J]. 光电工程，2011，38(5):16-20，29.
XUE Q SH. Optical design of spaceborne high resolution hyperspectral imagers with wide field of view[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(5): 16-20, 29. (in Chinese)

[21] 薛庆生. 星载宽波段远紫外高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报，2013，33(3)：0322001.
XUE Q SH. Optical system design of a spaceborne broadband far ultraviolet hyperspectral imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0322001. (in Chinese)

[22] 薛庆生，黄煜，林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报，2011，31(8)：0822001.

XUE Q SH, HUANG Y, LIN G Y. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0822001. (in Chinese)

[23] **巩盾，王红. 空间高光谱成像仪的光学设计[J]. 红外与激光工程**，2014，43(2)：541-545.
GONG D, WANG H. Optical design of hyperspectral imaging spectrometer on space[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 541-545. (in Chinese)

[24] **梁静秋，梁中翥，吕金光，等. 空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究[J]. 中国光学**，2015，8(2)：277-298.
LIANG J Q, LIANG ZH ZH, LÜ J G, *et al*.. Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 277-298. (in Chinese)

[25] **王峰. 无人机载大视场光栅色散成像光谱仪光学系统设计[D]. 西安：中国科学院西安光学精密机械研究所**，2014.
WANG F. *Optical System Design for Wide-Angle of the Unmanned Airborne Grating Imaging Spectrometer*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[26] **方煜. 成像光谱仪光学系统设计与像质评价研究[D]. 西安：中国科学院西安光学精密机械研究所**，2013.
FANG Y. *Optical Design of Imaging Spectrometer and Research on the Assessment of Image Quality*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[27] **王保华，阮宁娟，郭崇岭，等. 机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报**，2015，35(10)：1022001.
WANG B H, RUAN N J, GUO CH L, *et al*.. Optical system design of airborne light and compact high resolution imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022001. (in Chinese)

[28] **徐奉刚，黄玮. 遗传算法在离轴四反光学系统设计中的应用[J]. 光学 精密工程**，2017，25(8)：2076-2082.
XU F G, HUANG W. Application of genetic algorithm in the design of off-axis four-mirror optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2076-2082. (in Chinese)

[29] **李珣. 光栅型成像光谱仪光学系统设计[D]. 西安：西安工业大学**，2012.
LI X. *Optical System Design of Gratings-based Imaging Spectrometer*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012. (in Chinese)

[30] **撖芃芃. 成像光谱仪同心光学系统的研究[J]. 中国光学与应用光学**，2009，2(2)：157-162.
HAN P P. Research of concentric optical systems of imaging spectrometers[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 157-162. (in Chinese)

[31] **王跃明，郎均慰，王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展**，2013，50(1)：010008.
WANG Y M, LANG J W, WANG J Y. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010008. (in Chinese)

[32] **吴振洲. 微型 Offner 成像光谱仪和光谱数据处理[D]. 合肥：中国科学技术大学**，2012.
WU ZH ZH. *Compact Offner Imaging Spectrometer and Spectral Data Pocessing*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)

[33] **季轶群，宫广彪，朱善兵，等. 微型集成超光谱成像系统[J]. 光学 精密工程**，2009，17(4)：727-731.
JI Y Q, GONG G B, ZHU SH B, *et al*.. Minimal integrated hyperspectral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 727-731. (in Chinese)

[34] KIM S H, KONG H J, CHANG S. Aberration analysis of a concentric imaging spectrometer with a convex grating[J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 6-10.

[35] CHANG S. Quality factors of an aberrant Gaussian beam diffracted through a convex grating spectrometer[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(3): 1116-1120.

[36] **孙佳音，刘英，李淳，等.** Offner **型与** Dyson **型长波红外成像光谱仪性能对比研究[J]. 光学学报**，2014，34(10)：1030003.
SUN J Y, LIU Y, LI CH, *et al*.. Comparative study on performances of long-wave infrared imaging spectrometers based on Offner form and Dyson form[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10):

1030003. (in Chinese)

[37] 崔继承，刘玉娟，潘明忠，等. 成像光谱仪一体化设计[J]. 光谱学与光谱分析，2012，32(3)：839-843.
CUI J CH，LIU Y J，PAN M ZH，*et al*.. The integrative design for imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*，2012，32(3)：839-843. (in Chinese)

[38] 刘玉娟，崔继承，巴音贺希格，等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. 光学 精密工程，2012，20(1)：52-57.
LIU Y J，CUI J CH，BAYANHESHIG，*et al*.. Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Opt. Precision Eng.*，2012，20(1)：52-57. (in Chinese)

[39] CHRISP M P. Convex diffraction grating imaging spectrometer：US，5880834[P]. 1999-03-09.

[40] 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.

[41] 裴梓任，黄元申，张大伟，等. Offner 型成像光谱仪波长使用范围和光谱分辨率研究[J]. 光子学报，2014，43(7)：0730004.
PEI Z R，HUANG Y SH，ZHANG D W，*et al*.. Research of wavelength range and spectral resolution for Offner imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*，2014，43(7)：0730004. (in Chinese)

[42] 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 spectrometers[J]. *Optical Instruments*，2005，27(6)：38-42. (in Chinese)

[43] LUCKE R L. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer[J]. *Optical Engineering*，2007，46(7)：073004.

[44] PRIETO-BLANCO X，MONTERO-ORILLE C，GONZÁLEZ-NUÑEZ H，*et al*.. Imaging with classical spherical diffraction gratings：the quadrature configuration[J]. *Journal of the Optical Society of America A*，2009，26(11)：2400-2409.

[45] PRIETO-BLANCO X，MONTERO-ORILLE C，GONZÁLEZ-NUÑEZ H，*et al*.. The Offner imaging spectrometer in quadrature[J]. *Optics Express*，2010，18(12)：12756-12769.

[46] PRIETO-BLANCO X，GONZÁLEZ-NUÑEZ H，DE LA FUENTE R. Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*，2011，28(11)：2332-2339.

[47] PRIETO-BLANCO X，DE LA FUENTE R. Compact Offner - Wynne imaging spectrometers[J]. *Optics Communications*，2014，328：143-150.

[48] 张营，丁学专，杨波，等. 大视场小 F 数同轴 Offner 结构热红外光谱仪的设计[J]. 红外技术，2016，38(7)：537-541.
ZHANG Y，DING X ZH，YANG B，*et al*.. The design of coaxial Offner thermal infrared spectrometer with WFOV[J]. *Infrared Technology*，2016，38(7)：537-541. (in Chinese)

[49] 张营. 长波红外高光谱成像仪光学技术研究[D]. 上海：中国科学院上海技术物理研究所，2016.
ZHANG Y. *Optical Technology of Long-wave Infrared Hyperspectral Imaging*[D]. Shanghai：Shanghai Institute of Technical Physics，Chinese Academy of Sciences，2016. (in Chinese)

[50] 陈伟，郑玉权，薛庆生. 宽视场航空高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光子学报，2014，43(10)：1022001.
CHEN W，ZHENG Y Q，XUE Q SH. Optical system design of airborne wide field-of-view hyperspectral imager[J]. *Acta Photonica Sinica*，2014，43(10)：1022001. (in Chinese)

[51] 佟亚军，吴刚，周全，等. Offner 成像光谱仪的设计方法[J]. 光学学报，2010，30(4)：1148-1152.
TONG Y J，WU G，ZHOU Q，*et al*.. Design method of Offner-type imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*，2010，30(4)：1148-1152. (in Chinese)

[52] 薛汝东，季轶群，沈为民. Offner 型短波红外成像光谱仪分光系统的设计[J]. 苏州大学学报：自然科学版，2011，27(3)：61-66.
XUE R D，JI Y Q，SHEN W M. Design of a spectroscopic system for SWIR Offner imaging spectrometer[J]. *Journal of Suzhou University：Natural Science Edition*，2011，27(3)：61-66. (in Chinese)

[53] 王娟，吕丽军. 光栅波像差理论的推广[J]. 上海大学学报：自然科学版，2008，14(2)：177-182.
WANG J，LÜ L J. Improvement of wave-front aberration theory of grating[J]. *Journal of Shanghai University：Natural Science*，2008，14(2)：177-182. (in Chinese)

[54] 刘光宏，吴刚，凌青，等. Offner 成像光谱仪建模及像差分析[J]. 光学学报，2011，31(3)：0322001.
LIU G H，WU G，LING Q，*et al*.. Modelling of Offner imaging spectrometers and aberration analysis[J]. *Acta Optica Sinica*，2011，31(3)：0322001.（in Chinese）

[55] 韩姗，黄元申，李柏承，等. 消像差 Offner 成像光谱仪的研究进展[J]. 激光技术，2015，39(1)：33-38.
HAN SH，HUANG Y SH，LI B CH，*et al*.. Progress of Offner imaging spectrometers for eliminating aberration[J]. *Laser Technology*，2015，39(1)：33-38.（in Chinese）

[56] 李文昊，姜岩秀，吴娜，等. 极紫外波段变栅距光栅刻槽密度变化及光谱分辨能力分析[J]. 发光学报，2015，36(9)：1094-1099.
LI W H，JIANG Y X，WU N，*et al*.. Analysis for groove density and spectral resolution of varied-line-space gratings in EUV spectrum[J]. *Chinese Journal of Luminescence*，2015，36(9)：1094-1099.（in Chinese）

[57] XIANG L Q，MIKES T. Corrected concentric spectrometer：US，6266140[P]. 2001-07-24.

[58] 季轶群，沈为民. Offner 凸面光栅超光谱成像仪的设计与研制[J]. 红外与激光工程，2010，39(2)：285-287.
JI Y Q，SHEN W M. Design and manufacture of Offner convex grating hyper-spectral imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2010，39(2)：285-287.（in Chinese）

[59] 赵旭龙，巴音贺希格，李文昊，等. 光谱仪中球面聚焦反射镜和凹面全息光栅像差互补的一体化设计[J]. 光学学报，2016，36(6)：0605002.
ZHAO X L，BAYANHESHIG，LI W H，*et al*.. Integrated design to complement aberrations of spherical focusing mirrors and concave holographic gratings in spectrometers[J]. *Acta Optica Sinica*，2016，36(6)：0605002.（in Chinese）

[60] 朱向冰，付绍军，叶为全，等. 消像差光栅的理论及实验研究[J]. 光学 精密工程，2003，11(4)：354-358.
ZHU X B，FU SH J，YE W Q，*et al*.. Theory，design，manufacture and measurement of aberration reducing gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*，2003，11(4)：354-358.（in Chinese）

[61] 孔鹏，巴音贺希格，李文昊，等. 宽波段全息罗兰光栅的优化[J]. 中国激光，2011，38(4)：0409003.
KONG P，BAYANHESHIG，LI W H，*et al*.. Optimization of Rowland circle mounts for broadband spectrographs[J]. *Chinese Journal of Lasers*，2011，38(4)：0409003.（in Chinese）

作者简介：



赵美红(1991—)，女，山东济宁人，博士研究生，2014 年于山东师范大学获得学士学位，主要从事凸面全息光栅设计方面的研究。E-mail：1251706254@qq.com

导师简介：



李文昊(1980—)，男，内蒙古赤峰人，博士，研究员，博士生导师，2002 年于陕西科技大学获得学士学位，2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事平面、凹面全息光栅的理论设计及制作工艺等方面的研究。E-mail：leewenho@163.com