

激光与光电子学进展

凸面光栅同心结构成像光谱仪的研究进展

沈宇航¹, 倪争技^{1,2*}, 黄元申^{1,2}, 徐邦联^{1,2}, 郭贝¹, 王丁陆¹

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²上海光学仪器研究所, 上海 200093

摘要 介绍了基于同心结构的凸面光栅成像光谱仪的研究背景、设计方案和结构特点,综述了凸面光栅同心结构成像光谱仪在国内外目前主要的五种结构类型,包括 Offner 型、非共面型、折反射型、+1 级衍射型、自由曲面型。总结了五种结构类型的优点和缺点,对研发新一代具有高成像质量、高分辨率、高衍射效率、大相对孔径、长狭缝、宽波长范围的轻小型成像光谱仪具有重要的指导意义。

关键词 成像系统; 成像光谱仪; 凸面光栅; 同心结构; 光学设计

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0900002

Research Progress of Concentric Imaging Spectrometer with Convex Grating

Shen Yuhang¹, Ni Zhengji^{1,2*}, Huang Yuanshen^{1,2}, Xu Banglian^{1,2}, Guo Bei¹, Wang Dinglu¹

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Shanghai Institute of Optical Instruments, Shanghai 200093, China

Abstract The research background, design scheme, and structure characteristics of a convex grating imaging spectrometer based on a concentric structure are introduced. Five main configuration types of concentric imaging spectrometers with a convex grating at home and abroad are reviewed, including Offner type, off-plane type, catadioptric type, +1st order diffraction type, and freeform surface type. The advantages and disadvantages of these five configuration types are summarized. It has important guiding significance for the research and development of a new generation of light and small imaging spectrometers with high imaging quality, high resolution, high diffraction efficiency, large relative aperture, long slit, and wide wavelength range.

Key words imaging systems; imaging spectrometer; convex grating; concentric structure; optical design

OCIS codes 110.3055; 120.4820; 120.6200; 220.4830; 300.6190

1 引 言

成像光谱仪从 20 世纪 80 年代开始用于获取非均匀场景的空间信息和光谱信息^[1],具有图谱合一

性,在遥感领域中发挥着重要作用,可用于执行许多不同的任务,应用领域包括航天航空、林业、农业、医学、海洋学及生态学等^[2-9]。为了更有效、更准确地获取信息,在高光谱遥感任务中通常采用凸面

收稿日期: 2020-08-11; 修回日期: 2020-09-08; 录用日期: 2020-10-12

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101904)、国家自然科学基金天文联合基金(U1831133)

*E-mail: sioi@usst.edu.cn

光栅同心结构成像光谱仪^[10-13],它们具有简单和紧凑的配置,在系统的整个光谱范围内具有高成像质量、高信噪比、低谱线弯曲及低色畸变等优点,并且体积和质量都比平面光栅成像光谱仪小,具有良好的应用前景。

凸面光栅同心结构成像光谱仪起源于 1973 年 Offner^[14]提出的同心三反射镜光学成像系统,该系统由一个大的凹面反射镜和一个小的凸面反射镜组成(具有共同的曲率中心),在圆环域具有最佳成像质量。1977 年, Mertz^[15]提出一种将同心三反射镜系统中的凸面镜换成凸面光栅的思想,这为之后凸面光栅同心结构成像光谱仪的设计提供了基础。1987 年, Kwo 等^[16]基于 Mertz 的思想设计了凸面光栅同心结构成像光谱仪,该光谱仪由一个大凹面反射镜和一个同心的凸面光栅组成,当凹面镜的曲率半径等于 2 倍的凸面光栅曲率半径时,系统的三阶像差抵消,只剩下五阶以上的系统像差,这是凸面光栅同心结构成像光谱仪的雏形。近年来,国内的相关研究也逐渐展开,苏州大学分析了凸面光栅对 Offner 成像光谱仪性能的影响,研究了光栅曲线槽形和凸面多闪耀光栅对光栅衍射效率的影响^[17-18];中国科学院上海技术物理研究所研制的高分五号可见短波红外高光栅成像仪采用改进型 Offner 结构凸面光栅分光,综合性能处于国际领先水平^[19];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究了小型 Offner 成像光谱仪的优缺点,并给出了结构设计及分析^[20-21]。

三十多年来,研究人员对凸面光栅同心结构成像光谱仪进行了详细的分析,提出了不同的设计方案:Offner 型^[22-35]、非共面型^[36-42]、折反射型^[43-50]、+1 级衍射型^[51-56]及自由曲面型^[57-68],这 5 种类型的凸面光栅同心结构成像光谱仪均在相关领域得到了应用和发展,对于研发新一代的成像光谱仪具有非常重要的意义。

2 凸面光栅同心结构成像光谱仪的研究进展

2.1 Offner 型仪器的研究进展

Offner 型成像光谱仪是从 Offner 同心三反射镜成像光学系统的基础上演变而来的,将其中的凸面反射镜换成凸面光栅,作为凸面光栅同心结构成像光谱仪的基础结构。1999 年, Chrisp^[22]对其进行了改进,将大凹面反射镜换成两个曲率半径相同或不同的小凹面反射镜,原理结构如图 1 所示,其中凸面

光栅 G 与凹面反射镜 M_1 、 M_2 的曲率中心重合于轴上点 C,狭缝上的物点 O 发出的光线经过 M_1 反射到凸面光栅 G 上,再经凸面光栅 G 衍射到 M_2 上,最后经 M_2 聚焦成像至像点 I_1 、 I_2 。通过调节凹面反射镜 M_1 、 M_2 的曲率半径和距离来增加光谱仪设计的自由度;采用罗兰圆配置,解决了传统光谱仪的谱线弯曲和色畸变的问题,实现光谱仪的小型化和轻量化。但是该方案仅消除了某给定波长的像散,并且没有给出该结构的通用设计方案。

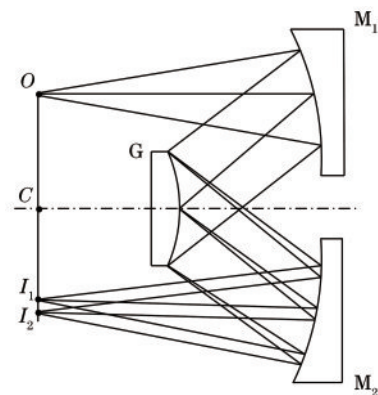


图 1 Offner 型成像光谱仪结构示意图

Fig. 1 Schematic of the Offner imaging spectrometer

2006 年, Prieto-Blanco 等^[25]分析设计了基于 Offner 结构的成像光谱仪,提出了可以快速设计此结构系统的方法。如图 2 所示,由于光栅色散,子午像和弧矢像实际上是曲线而不是点, Chrisp 提出的方案仅确保了曲线相交处波长为 $\bar{\lambda}$ 的像散为零,若使子午聚焦曲线和弧矢聚焦曲线在波长 $\bar{\lambda}$ 处彼此相切,则这种情况可以确保这些聚焦曲线在光谱仪的整个光谱范围内保持高度匹配,所以选择相对于 x 轴倾斜 α 角度的像平面,使得像平面均相切于子午聚焦曲线和弧矢聚焦曲线。该方法能很好地减小光谱仪整个光谱范围内每个波长的像散,因此,即使在系统 F 数较小的情况下,无需使用特定的像差校正光栅,也无需通过昂贵的光学设计软件进行数值优化,也可获得光学系统成像质量良好的光谱仪。提供的设计实例显示,对于 $f/2.5$ 和波长为 $400\sim 1000$ nm 的光谱仪,均方根(RMS)光斑半径值小于 $5\ \mu\text{m}$ 。但是,该方法也只是消除了特定波长处的像散,整个波长范围内的像散只是得到了减小并不是最小,因此需要进一步的改进。

2015 年, Ji 等^[33]进一步提供了更实用、更通用的设计方案,设计研制了 Offner 型可见近红外成像光谱仪,提出的方法可对 Offner 型成像光谱仪进行有

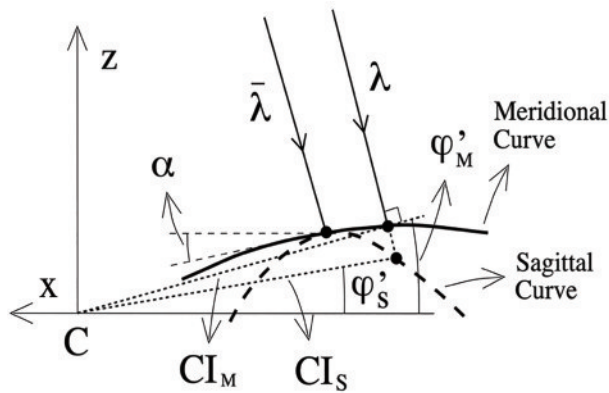


图 2 子午聚焦曲线和弧矢聚焦曲线在中心波长 $\bar{\lambda}$ 处相切的示意图^[25]

Fig. 2 Schematic of meridional focusing curve being tangent to sagittal focusing curve at $\bar{\lambda}$ wavelength^[25]

效设计,以实现整个波长范围内最小的像散。图 3(a)为 Offner 型成像光谱仪的子午聚焦曲线和弧矢聚焦曲线,物点 O 和它经过 M_1 、 G_2 和 M_3 所成的弧矢像都聚焦在弧矢聚焦线 OC 上, M_1 、 G_2 和 M_3 所成的子午像分别聚焦在 Curve1、Curve2 和 Curve3 上。基于波前像差理论,计算出几何参数与波前像差系数之间的关系,在弧矢平场的条件下,通过在整个波长范围内对子午波前像差系数进行积分,选择在最小积分值下获得的几何参数作为光谱仪的初始参数,即可获得在需要的波长范围内具有最小像散值的光谱仪结构。图 3(b)显示了像散随衍射角 β_2 的变化曲线,仅当 $\beta_2 < 20^\circ$ 时,可以很好地消除像散。根据该方法,研制了 $f/2.3$ 的 VNIR(400~1000 nm) 成像光谱仪,狭缝长为 12 mm,光谱分辨率为 0.6。

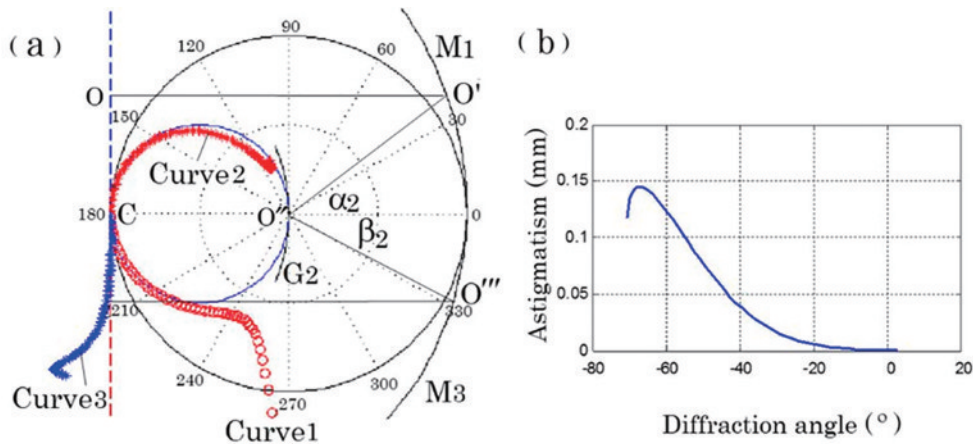


图 3 Offner 型成像光谱仪像散相关示意图^[33]。(a)Offner 型成像光谱仪的聚焦曲线;(b)像散与衍射角 β_2 的关系

Fig. 3 Schematic of astigmatism correlation for Offner imaging spectrometer^[33]. (a) Focusing curves of the Offner imaging spectrometer; (b) relationship between astigmatism and the diffraction angle β_2

2.2 非共面型仪器的研究进展

2007 年, Lucke^[36] 提出了一种非共面型凸面光栅同心结构成像光谱仪,与 Offner 型成像光谱仪共面结构不同的是该结构的入射平面与衍射平面不共面,为平面外色散,该平面包含镜面顶点和入射狭缝中心。

如图 4 所示,大和小的实线圆圈分别代表凹面反射镜和凸面光栅,虚线圆圈代表最佳成像圆(BIC),由于系统关于光轴对称,因此, BIC 上的任何物点都可以清晰成像于光轴相反侧的同一圆上,该圆的半径 H_0 满足

$$R_2 = \frac{R_1}{2\sqrt{1 - \frac{H_0^2}{R_1^2}}}, \quad (1)$$

$$\frac{H_0}{R_2} \approx \frac{1}{F}, \quad (2)$$

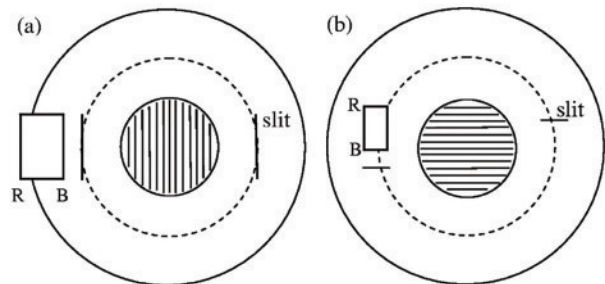


图 4 沿光轴视角的光谱仪结构示意图^[36]。(a)共面结构;(b)非共面结构

Fig. 4 Schematic of spectrometer configuration along optical axis angle of view^[36]. (a) In-plane configuration; (b) off-plane configuration

式中: R_1 、 R_2 分别为凹面反射镜和凸面光栅的曲率半径,满足 $R_1 = 2R_2$; F 为系统 f 数。当物点和像点

偏离 BIC 时,成像质量会下降,因此光学设计时,希望保持物点和像点尽可能靠近 BIC。共面结构如图 4(a)所示,入射狭缝和光栅的刻线均垂直于光学主平面,以产生平面内色散,导致色散沿 BIC 径向方向展开,因此,该结构的成像质量随着远离 BIC 快速下降。非共面结构如图 4(b)所示,入射狭缝和光栅的刻线均平行于光学主平面,以产生平面外色散,导致色散沿 BIC 切线方向展开,当入射狭缝较短时,整个光谱像都位于 BIC 上,系统成像质量保持良好。但该结构只适用于短狭缝系统,狭缝较短会导致进光量不足,系统的信噪比较低。

Prieto-Blanco 等^[37-38]基于非共面结构,提出了一种入射平面与衍射平面相互垂直的正交非共面结构。如图 5 所示,入射狭缝和光栅的刻线均与光学主平面成 45° ,导致色散沿 BIC 切线方向展开。对于给定波长处入射狭缝上的某一点,通过分析正交结构下的经典球形衍射光栅像差理论和调整结构参数,该点的像没有像散,系统成像质量良好,并且入射狭缝和成像平面位于光轴的同侧,可以大大降低成像光谱仪的体积。但是,随着入射狭缝上的点偏离特定设计点越远时,对应的像散也会越大,所以狭缝的长度会受到像散的限制。

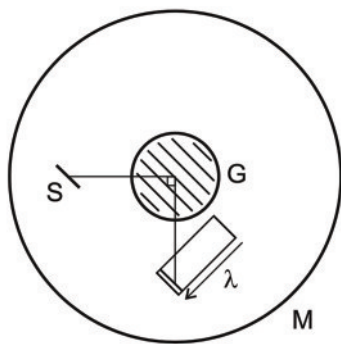


图 5 沿光轴视角的正交非共面结构光谱仪示意图^[38]

Fig. 5 Schematic of the quadrature off-plane configuration spectrometer along optical axis angle of view^[38]

2011 年, Prieto-Blanco 等^[39]基于系统光程函数理论(LPF)进一步分析了一般情况下非共面型凸面光栅同心结构成像光谱仪的设计方法,当狭缝上的一点位于凹面镜的罗兰圆上时,则可以得到平面外色散下像散校正的设计,为双镜或三镜非共面型凸面光栅同心结构成像光谱仪的设计提供了理论基础。

2016 年,高震宇等^[41]基于罗兰圆消像差原理设计推导出了一种改进式的非共面型凸面光栅同心

结构成像光谱仪,该光谱仪消除像散和彗差的同时有效解决了光路中光线遮挡的问题。使用该方法,能设计出光谱范围为 $350\sim 1000\text{ nm}$,色散宽度为 12.6 mm 且成像质量良好的成像光谱仪。对非共面结构与共面结构进行比较,结果表明,在高光谱分辨率的需求下,当入射狭缝长度较短时,非共面结构具有更好的成像质量,但随着狭缝长度增加,成像质量迅速恶化。对比结果还显示,非共面结构在谱线弯曲和谱带弯曲的校正能力上具有优势,可用于小体积高光谱分辨率成像光谱仪的设计。

2019 年, Pan 等^[42]基于上述对非共面结构的研究,研制了一种锥形衍射凸面光栅高光谱成像光谱仪用于海洋监测,光谱仪采用锥形衍射非共面结构和凸面闪耀光栅,以产生几乎不失真和光谱高保真的图像。介绍了锥形衍射非共面结构的成像特性和光学系统设计,如图 6 所示,包括两个球面反射镜 M_1 、 M_3 和一个凸面光栅 G,均为同曲率中心 C 配置,光栅刻线平行于 X 轴,入射平面 I 与衍射平面 II 的方位角分别为 γ 和 γ' 。在入射平面 I 中,入射狭缝和 C 之间的距离为 h 并且与 X 轴夹角为 φ ;在衍射平面 II 中,像点和 C 之间的距离为 h' 并且与 X 轴夹角为 φ' 。基于基本像差理论,讨论并推导了像差系数与结构参数之间的关系,可以在确定入射狭缝长度的条件下,获得在光谱范围内像散最小的光谱仪的初始结构参数。

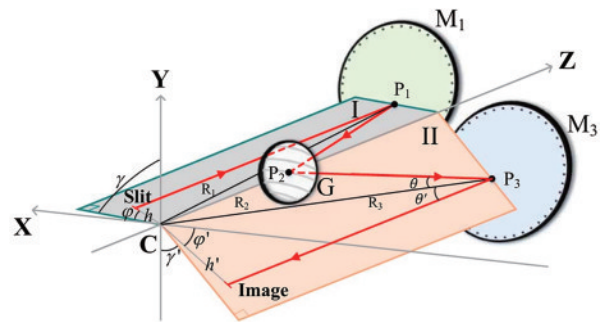


图 6 锥形衍射非共面结构的光路示意图^[42]

Fig. 6 Schematic of an optical path for a conical diffraction off-plane configuration^[42]

通过实验测试,测得光谱仪的最低光谱分辨率为 4.76 nm ,最大谱线弯曲为 $0.28\text{ }\mu\text{m}$,占像素大小的 5.6% ,最大谱带弯曲 $0.18\text{ }\mu\text{m}$,占像素大小的 3.6% ,验证了非共面结构应用于星载高光谱成像光谱仪上的可行性。

2.3 折反射型仪器的研究进展

1989 年, Wynne^[43]在全反射式的 Offner 中继系

统中通过在凸面镜前加入同心弯月透镜以引入折射来校正主光线的球差,扩大了最佳成像环形区域的宽度。1994年,Lobb^[44]利用这一折反射式结构,在 Offner 型光谱仪的凸面光栅前加入同心弯月透镜,设计了结构紧凑的大谱面光谱仪。

2014年,Prieto-Blanco 等^[45]设计分析了两种不同的折反射型结构,如图 7 所示。图 7(a)和图 7(b)分别为凸面光栅 G 位于同心弯月透镜 (ML) 外表面和内表面的结构示意图。

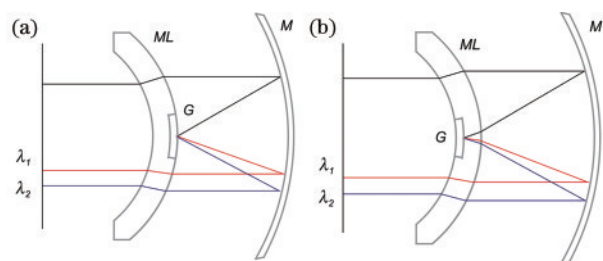


图 7 折反射型凸面光栅同心结构示意图^[45]。(a)凸面光栅位于同心弯月透镜外表面;(b)凸面光栅位于同心弯月透镜内表面

Fig. 7 Schematic of concentric catadioptric convex grating configuration^[45]. (a) Convex grating disposed on outer surface of a meniscus lens; (b) convex grating disposed on inner surface of a meniscus lens

在同心光学成像系统中,只有在严格的远心条件下才能有较好的成像质量,通过追迹主光线,折反射型凸面光栅同心结构成像光谱仪可在两个不同的离轴位置满足远心条件,即该结构具有两个最佳成像圆区域。Prieto-Blanco 等通过给出的 4 个设计实例,充分分析了两种折反射型结构在共面结构与非共面结构中的应用,弥补了非共面结构下狭缝长度较短的缺点,使得这两种结构的优势都能得到充分发挥。但是,这两种结构增加了装调难度和系统质量,并且在空间应用中易受温度的影响。

2019年,朱嘉诚等^[48]通过主光线追迹方法、罗兰圆条件及杨氏公式推导出了折反射型结构的像散表达式,分析了其像散特性,指出折反射型结构的消像散圆域大于 Offner 型结构的消像散圆环域,前者更适用于长狭缝。

为解决折反射型结构装调困难和易受温度影响的问题,Zhu 等^[49]进一步提出了一种相对孔径大、狭缝长的超紧凑同心折反射型成像光谱仪。如图 8 所示,它由同心布局的 3 个光学组件整体集成而成,即半球透镜 L1、弯月透镜 L2 和厚透镜 L3。衍射光栅 G 被蚀刻到 L2 凸面的中央,L3 的凹面 M 是反射

面,三个组件都以同一个曲率中心 C 胶合在一起,入射狭缝和检测器布置在 L1 平面上。该光谱仪是由光学组件制成的整体系统,不需要机械组件进行连接和固定。

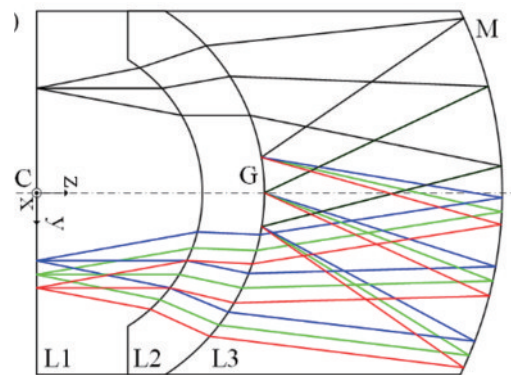


图 8 超紧凑同心折反射型成像光谱仪示意图^[49]

Fig. 8 Schematic of ultra-compact concentric catadioptric imaging spectrometer^[49]

热适应性是这种折反射系统最重要的性能之一,当工作温度变化时,透镜的曲率半径、厚度及折射率将相应变化,从而导致热散焦和图像质量下降。通过对具有不同热膨胀系数和热光系数的透镜材料进行匹配,补偿热散焦,从而实现无热化设计,该设计显示出卓越的热适应性,当工作温度在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时,成像质量的下降可忽略不计。然后,又讨论了其像散特性和消像散条件,通过追迹主光线来求解其子午像和弧矢像的位置,并得出像散的表达式,之后通过分析透镜的折射率和曲率半径对像散的影响,来确定透镜的材料和曲率半径,以实现最佳的消像散效果。设计实例显示了一种 $f/2.25$ 和狭缝长为 48 mm 的 VNIR ($400\sim 1000\text{ nm}$) 成像光谱仪,成像质量高并且失真小。设计结果显示,与 Offner 型设计相比,体积减小了 $1/10$;与 Dyson 型设计相比,长度减小了 $1/1.9$ 。

2020年,Lin 等^[50]提出了一种新型折反射型结构,如图 9 所示。将两个在背面具有反射涂层的透镜代替传统的球面反射镜,透镜的后表面和凸面光栅同心配置,来自入射狭缝的入射光将被透镜的前表面折射,然后被涂有反射膜的后表面反射,最后再被前表面折射,在传统的罗兰圆结构的基础上,利用折射透镜,系统的子午像距等于弧矢像距,同时消除了宽带光谱的彗差和像散。该结构解决了传统 Offner 型结构中像散的问题,透镜的应用进一步提高了设计的自由度。

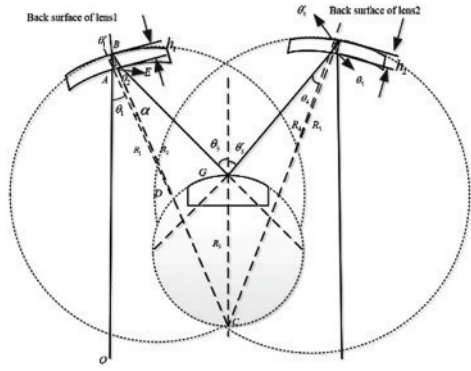


图 9 具有反射涂层的折反射结构示意图^[50]

Fig. 9 Schematic of a catadioptric configuration with reflective coating^[50]

2.4 +1 级衍射型仪器的研究进展

传统的凸面光栅同心结构成像光谱仪的凸面光栅均工作在-1级衍射,为提升光谱仪的性能和减小光谱仪的尺寸,2004年,Lobb^[51]设计了一种在地球静止轨道上工作,用于探测大气成分的成像光谱仪,该光谱仪工作波段分为三个,其中紫外和可见光波段的凸面光栅工作在+1级衍射,光谱分辨率分别提高至 0.12 nm 和 0.26 nm。2005年,Grange等^[52]为 Fireball (Faint Intergalactic Redshifted Emission BALLoon) 计划设计了一台光谱仪,如图 10(a)所示,凸面光栅工作在+1级衍射,狭缝与探测器位于光栅的同一侧。

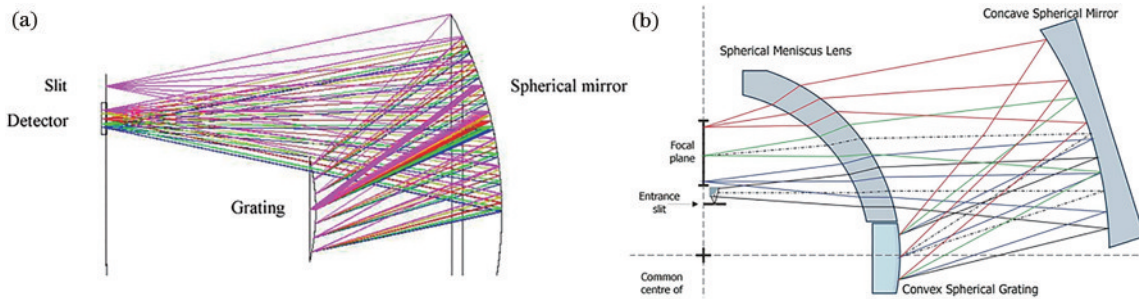


图 10 +1 级衍射型结构光路示意图^[52-53]。(a)常规结构;(b)加入弯月透镜的结构

Fig. 10 Schematic of +1st order diffraction configuration optical path^[52-53]. (a) Conventional configuration; (b) configuration with meniscus lens

2009年,Whyte等^[53]在+1级衍射型结构中加入弯月透镜以提高成像质量,并设计了用于大气差分光学吸收光谱的光谱仪,结构如图 10(b)所示,工作波段为紫外可见光波段(300~450 nm),光谱分辨率为 0.5 nm,应用于对汞气体的探测和分析。2013年,刘旭霞等^[55]分析了+1级衍射型结构的成像特性,运用杨氏公式分析其像散特性,给出了波长范围内消像散的方法,通过加入带有负像散的弯月透镜抵消系统中固有的正像散,并将其应用于拉曼光谱仪中。

2020年,Shen等^[56]进一步分析了+1级衍射型结构的特性,如图 11所示,根据光栅线密度的不同,像面具有三个不同的位置 I_1 、 I_2 和 I_3 ,通过增加光栅线密度,可以同时实现该结构光谱仪的高分辨率和紧凑性。设计实例显示,该结构衍射效率可提高至 74%,可在不增加系统尺寸的情况下光谱分辨率提高至 0.049 nm,具有小尺寸、高分辨率和高衍射效率的特性。

2.5 自由曲面型仪器的研究进展

具有自由曲面的光学器件为设计人员提供了前

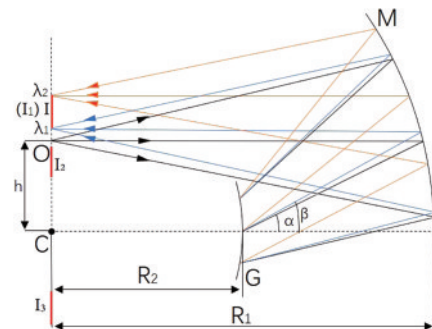


图 11 具有三种不同像面位置的+1级衍射型光路示意图^[56]

Fig. 11 Schematic of +1st order diffraction optical path with three different image plane positions^[56]

所未有的设计自由度和更强的像差校正能力。2015年,Reimers等^[57]介绍了Offner型成像光谱仪的元件从球面到非球面,最后到自由曲面的演变,使用光谱全场显示(SFFD)^[58]来分析对比其光学性能,SFFD在点网格上绘制了波前Zernike像差分量的大小和方向,能够快速可视化成像光谱仪的像差,并指导设计过程,结果显示,自由曲面型成像光谱仪能够将平均波前误差有效值降低 58%。2017年,Reimers

等^[62-63]进一步研究了紧凑型自由曲面成像光谱仪,设计了三种具有全球面、紧凑全球面及紧凑自由曲面的光谱仪。在性能分析中,将 Zernike 像散的 SFDD 与 RMS 波前误差一起显示,尺寸和性能的对比如图 12 所示,紧凑自由曲面与全球面、紧凑全球面的设计

相比,设计的体积紧凑了 5 倍并在所有波长和视场的情况下均能到达衍射极限,保持成像质量良好。通过自由曲面光学器件,平均波前误差有效值进一步降低了 65%,实现了光谱仪的紧凑性和像差校正,但是并没有分析各类自由曲面的性能。

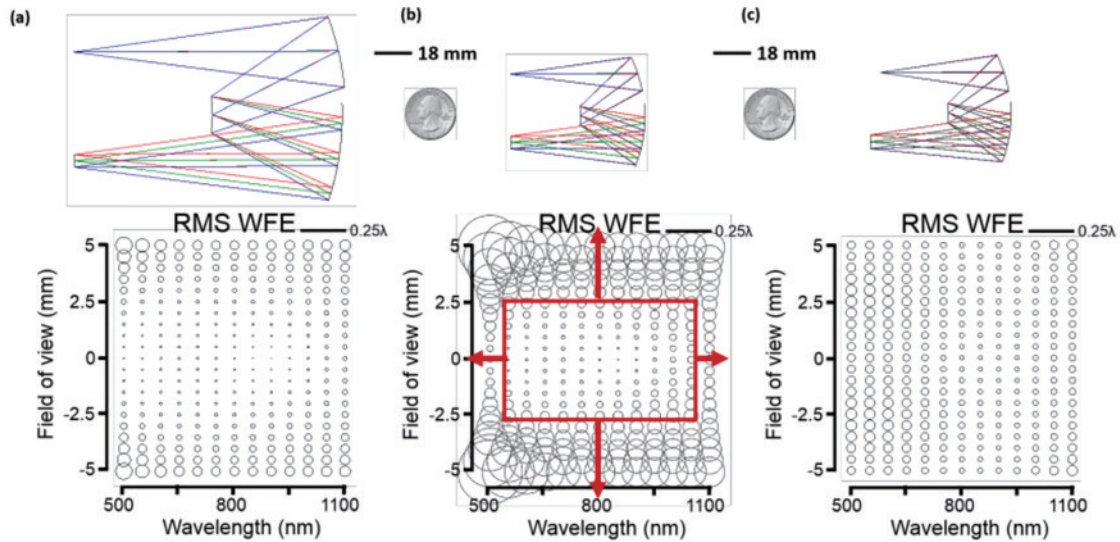


图 12 三种不同面型光谱仪尺寸和性能的对比如^[63]。(a)全球面型;(b)紧凑全球面型;(c)紧凑自由曲面型

Fig. 12 Comparison of dimensions and performance of three different face types of spectrometers^[63]. (a) All-spherical type; (b) compact all-spherical type; (c) compact freeform type

为了进一步分析各类自由曲面的性能,2016年,Wei等^[64]将自由曲面用于减小宽波长范围内的残留像差,并同时实现大的平场像面,设计的光谱仪可在 200~1500 nm 的波长范围内工作。在设计过程中,使用三种不同类型的自由曲面来评估其性能,即变形非球面(AAS)、X-Y 多项式曲面(XYS)和 Zernike 多项式曲面(ZPS),并在光学软件中对具有球面、非球面(ASP)和三个自由曲面的系统进行了优化。它们的区别在于镜面的表达方式,5个优化系统的评价函数如图 13 所示,显然 ZPS 和 XYs 的评价函数比球面、ASP 和 AAS 更好,所以采用 ZPS 或 XYs 型的自由曲面作为镜面,可以使光谱仪得到更好的成像质量。

与球面不同,自由曲面在分配光强方面更具灵活性,因此可以校正光谱仪在整个宽波长范围内的非对称像差。为了进一步拓宽光谱仪的波长范围,2019年,Feng等^[67]提出了一种紧凑的多通道自由曲面型成像光谱仪,该光谱仪包括紫外、可见近红外和短波红外光谱波段,如图 14 所示,在检测器附近增加了 1 个滤光片和 2 个反射镜,可以将很宽的光谱带分为三个独立的通道,引入 Zernike 多项式表示

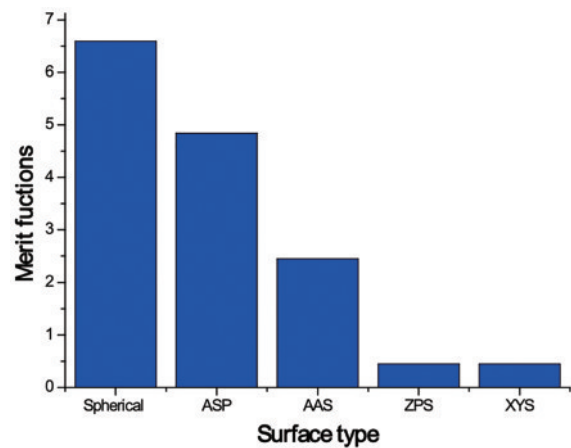
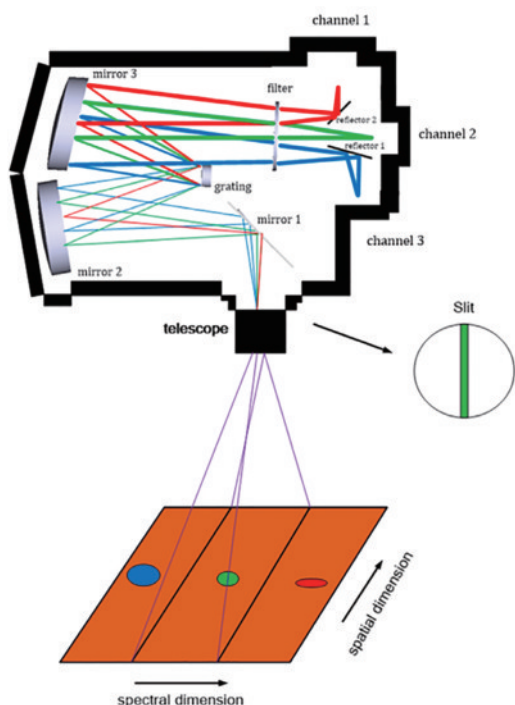


图 13 不同表面类型的评价函数^[64]

Fig. 13 Merit functions of different surface types^[64]

的自由曲面,以补偿加宽光谱和增加视场导致的离轴高级像差。

根据上述方法,设计了具有 48 mm 长狭缝和 240~2500 nm 宽光谱的光谱仪,这种独特的设计方法仅使用一个成像光谱仪即可覆盖从紫外到短波红外的宽光谱,而无需进行系统拼接或研究宽光谱检测器,并且自由曲面在平衡像差和减小体积方面起着关键作用,与现有的相似设计相比,该系统的

图 14 多通道自由曲面型成像光谱仪示意图^[67]Fig. 14 Schematic of a multichannel freeform surface imaging spectrometer^[67]

尺寸和质量减少了 40% 以上,从而实现了尺寸的紧凑和成本的降低,在机载和卫星应用中具有很大的潜力。

3 总结与展望

随着各个领域研究与应用需求的提高,特别是光学遥感领域的不断发展,高性能的成像光谱仪得到了人们越来越多的关注与研究,凸面光栅同心结构成像光谱仪由于具有结构简单紧凑、光学性能高、适用于空间环境等优点而受到广大研究人员的青睐。为了满足更高标准的应用需求,国内外学者对凸面光栅同心结构成像光谱仪展开了一系列研究。

目前,凸面光栅同心结构成像光谱仪的研究主要体现在以下 5 个类型:1) Offner 型作为凸面光栅同心结构成像光谱仪的基础结构,具有良好的对称性和光学性能,通用的设计方案已较为成熟,但是该基础结构的消像差效果不够明显,启发了研究人员对其结构的改进与开发;2) 非共面型可以在最佳成像圆附近得到更好的成像质量,在谱线弯曲和谱带弯曲的校正能力上也具有优势,但是该结构只适用于短狭缝系统;3) 折反射型扩大了最佳成像环形

区域的宽度,适用于长狭缝系统,弥补了非共面型短狭缝的缺点,弯月透镜的应用进一步提高了设计的自由度,但是该结构增加了系统装调难度和系统质量,并且在空间应用中易受温度的影响;4) +1 级衍射型可以显著提升光谱仪的分辨率与衍射效率,并同时减小光谱仪的体积与质量,但是缩短了光谱仪的波长范围;5) 自由曲面型为设计人员带来了前所未有的设计自由度和更强的像差校正能力,实现了光谱仪的紧凑性和宽波长范围内更好的成像质量,但是自由曲面的加工和检测较为困难。综上所述,5 种结构各有优缺点,根据应用需求,合理结合运用各类结构,各类型之间互相取长补短将成为光谱仪的重要设计方向。+1 级衍射型在小尺寸、高分辨率和高衍射效率方面有优于其他类型的显著特性,自由曲面型在设计自由度和像差校正能力方面有着前所未有的优势,从这两种类型结构的角度出发设计光谱仪将成为研制新一代光谱仪的必然趋势。

在接下来的研究中,上海理工大学光栅光谱仪课题组对基于已有的 +1 级衍射型的研究成果进行结构改进,引入弯月透镜和自由曲面,在解决波长范围较短问题的同时增加狭缝长度、提高像差校正能力以及设计自由度。在充分发挥 +1 级衍射型结构小尺寸、高分辨率和高衍射效率特性的基础上,进一步增加了光谱仪的紧凑性和宽波长范围内更好的成像质量。未来,随着凸面光栅同心结构成像光谱仪研究的不断深入,具有高成像质量、高分辨率、高衍射效率、大相对孔径、长狭缝、宽波长范围的轻小型成像光谱仪将广泛应用于航天航空、林业、农业、医学、海洋学和生态学等与国民经济发展密切相关的各个领域。

参 考 文 献

- [1] Li Q C, Jiang Y J. Principle of spectroscopic instrument [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999: 311-323.
李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999: 311-323.
- [2] Diner D J, Bruegge C J, Martonchik J V, et al. MISR: a multiangle imaging spectroradiometer for geophysical and climatological research from Eos [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(2): 200-214.
- [3] Fisher J, Antoniadis J A, Rollins C, et al. Hyperspectral imaging sensor for the coastal

- environment[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3482: 179-186.
- [4] Davis C, Bowles J, Leathers R, et al. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. Optics Express, 2002, 10(4): 210-221.
- [5] Zheng Y Q, Yu B X. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1): 75-80.
郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 75-80.
- [6] Zuo B J, Zhang A H. Optical system design of the imaging spectrometer[J]. Optical Technology, 2002, 28(2): 187-188, 190.
左保军, 张爱红. 成像光谱仪的光学系统设计[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 187-188, 190.
- [7] Xue Q S. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- [8] Yu F, Wen Q, Lei H J, et al. Research progress in key technologies on near infrared microspectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100003.
庾繁, 温泉, 雷宏杰, 等. 微型近红外光谱仪关键技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 100003.
- [9] Huang L K, Wen Q, Wen Z Y, et al. Micro-ultraviolet spectrometer analysis system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 053003.
黄良坤, 温泉, 温志渝, 等. 微型紫外光谱仪分析系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 053003.
- [10] Rowlands N, Neville R A, Powell I P. Short-wave infrared (SWIR) imaging spectrometer for remote sensing[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2269: 237-247.
- [11] Li T H, Yang H H, Zhao Y P. Imaging spectrometer remote sensing: current status and future[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1997, 12(2): 55-59.
李天宏, 杨海宏, 赵永平. 成像光谱仪遥感现状与展望[J]. 遥感技术与应用, 1997, 12(2): 55-59.
- [12] Zheng Y Q, Wang H, Wang Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2629-2637.
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.
- [13] 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.
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.
- [14] Offner A. Unit power imaging catoptrics anastigmat: US3748015[P]. 1973-07-24.
- [15] Mertz L. Concentric spectrographs [J]. Applied Optics, 1977, 16(12): 3122-3124.
- [16] Kwo D, Lawrence G, Chrisp M. Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system[J]. Proceedings of SPIE, 1987, 818: 275-281.
- [17] 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.
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.
- [18] Zhu J C, Jin Y M, Huang X J, et al. Design and optimization of broadband convex blazed grating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11): 1120003.
朱嘉诚, 靳阳明, 黄绪杰, 等. 宽波段凸面闪耀光栅优化设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1120003.
- [19] Liu Y N, Sun D X, Hu X N, et al. Development of visible and short-wave infrared hyperspectral imager onboard GF-5 satellite[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(4): 333-344.
刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制[J]. 遥感学报, 2020, 24(4): 333-344.
- [20] Zheng Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6): 650-657.
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.
- [21] Liu W. Design and analysis of structure of compact Offner spectral imaging system[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(2): 157-163.
刘伟. 小型 Offner 凸光栅光谱成像系统的结构设计及分析[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 157-163.
- [22] Chrisp M P. Convex diffracting grating imaging

- spectrometer: US5880834[P]. 1999-03-09.
- [23] Huang Y S, Ni Z J. Research of the concentric three-reflection optical system [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(2): 42-46.
黄元申, 倪争技. 同心三反射镜光学系统研究[J]. *光学仪器*, 2005, 27(2): 42-46.
- [24] Huang Y S, Ni Z J, Zhuang S L. Research of the concentric optical system of grating spectrometers [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(6): 38-42.
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.
- [25] 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.
- [26] Huang Y S, Chen N S, Zhang D W, et al. Design method for Offner imaging spectrometer composed of convex grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(6): 1236-1239.
黄元申, 陈南曙, 张大伟, 等. 一种凸面光栅 Offner 结构成像光谱仪的设计方法[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(6): 1236-1239.
- [27] 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.
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.
- [28] 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.
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.
- [29] Liu Y J, Cui J C, Bayanheshig, et al. Design and application of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 52-57.
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.
- [30] Han S, Huang Y S, Li B C, et al. Theoretical analysis and research about high image quality Offner imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0430001.
韩姗, 黄元申, 李柏承, 等. 高成像质量 Offner 成像光谱仪的理论分析与研制[J]. *光子学报*, 2014, 43(4): 0430001.
- [31] Pei Z R, Huang Y S, Zhang D W, et al. Research of wavelength range and spectral resolution for Offner imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(7): 0730004.
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.
- [32] Pei Z R, Huang Y S, Ni Z J. Research of resolution for Offner two-mirror three-reflection imaging spectrometer [J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(2): 147-151.
裴梓任, 黄元申, 倪争技. Offner 双镜三反射成像光谱仪分辨率的研究[J]. *光学仪器*, 2014, 36(2): 147-151.
- [33] Ji Y Q, Li J X, Zhou J K, et al. Analytical design and implementation of an imaging spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(3): 517-526.
- [34] Lee C M, Cable M L, Hook S J, et al. An introduction to the NASA Hyperspectral InfraRed Imager (HypIRI) mission and preparatory activities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 167: 6-19.
- [35] Zheng Z Z, Yang Z, Qin Y T, et al. Structure analysis and experiment of an Offner-type short-wave infrared imaging spectrometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 053001.
郑志忠, 杨忠, 秦远田, 等. Offner 型短波红外成像光谱仪的结构分析与实验[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 053001.
- [36] Lucke R L. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(7): 073004.
- [37] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, González-Núñez 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.
- [38] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, González-Núñez H, et al. The Offner imaging spectrometer in quadrature [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12756-12769.
- [39] Prieto-Blanco X, González-Núñez 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.
- [40] González-Núñez H, Prieto-Blanco X, de la Fuente R. Pupil aberrations in Offner spectrometers [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(4): 442-449.
- [41] Gao Z Y, Fang W, Song B Q, et al. Design of off-plane Offner spectrometer with high spectral resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2):

0211002.
高震宇, 方伟, 宋宝奇, 等. 非共面 Offner 结构高分辨率成像光谱仪设计[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0211002.
- [42] Pan Q, Chen X H, Zhou J K, et al. Manufacture of the compact conical diffraction Offner hyperspectral imaging spectrometer [J]. Applied Optics, 2019, 58(27): 7298-7304.
- [43] Wynne C G. Optical imaging systems: US4796984 [P]. 1989-01-10.
- [44] Lobb D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers[J]. Applied Optics, 1994, 33(13): 2648-2658.
- [45] Prieto-Blanco X, de la Fuente R. Compact Offner-Wynne imaging spectrometers[J]. Optics Communications, 2014, 328: 143-150.
- [46] Zhang Y, Ding X Z, Yang B, et al. The design of coaxial Offner thermal infrared spectrometer with WFOV [J]. Infrared Technology, 2016, 38(7): 537-541.
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.
- [47] 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.
- [48] Zhu J C, Shen W M. Compact anastigmatic long-slit spectrometer[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(4): 542-548.
朱嘉诚, 沈为民. 紧凑型消像散长狭缝光谱仪光学系统[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(4): 542-548.
- [49] Zhu J C, Shen W M. Analytical design of a thermal ultra-compact concentric catadioptric imaging spectrometer[J]. Optics Express, 2019, 27(21): 31094-31109.
- [50] Lin J, Wu S, Yu L. Broadband astigmatism-free Offner imaging spectrometer with high resolution [J]. Applied Optics, 2020, 59(4): 1110-1116.
- [51] Lobb D R. Design of a spectrometer system for measurements on Earth atmosphere from geostationary orbit[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5249: 191-202.
- [52] Grange R, Milliard B, McLean R, et al. Three-dimensional spectroscopy with a fiber-fed NUV spectrograph[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5898: 589812.
- [53] Whyte C, Leigh R J, Lobb D, et al. Assessment of the performance of a compact concentric spectrometer system for atmospheric differential optical absorption spectroscopy[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2009, 2(2): 789-800.
- [54] Julian J P, Didona K M, Milner D P, et al. Multi-channel, multi-spectrum imaging spectrometer: US7518722 [P/OL]. 2009-04-14 [2020-08-10]. <https://patents.justia.com/patent/7518722>.
- [55] Liu X X, Ji Y Q, He H C, et al. Analysis and design of Littrow-Offner spectroscopic system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422009.
刘旭霞, 季轶群, 贺虎成, 等. Littrow-Offner 型分光系统的分析与设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422009.
- [56] Shen Y H, Ni Z J, Huang Y S, et al. Analytical design of a high-performing +1st order diffraction convex grating imaging spectrometer [J]. Applied Optics, 2020, 59(12): 3760-3765.
- [57] Reimers J, Schiesser E M, Thompson K P, et al. Comparison of freeform imaging spectrometer design forms using spectral full-field displays[C]//Freeform Optics 2015, June 7-11, 2015, Arlington, Virginia, United States. Washington, DC: OSA, 2015: FM3B.3.
- [58] Reimers J, Rolland J P. Spectral full-field displays for spectrometers[C]//International Optical Design Conference 2014, June 22-26, 2014, Kohala Coast, Hawaii, United States. Washington, DC: OSA, 2014: ITh3A.5.
- [59] Yang T, Zhu J, Wu X F, et al. Direct design of freeform surfaces and freeform imaging systems with a point-by-point three-dimensional construction-iteration method[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10233-10246.
- [60] Peschel T, Damm C, Beier M, et al. Design of an imaging spectrometer for Earth observation using freeform mirrors [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10562: 1056237.
- [61] Pang Z H, Fan X W, Ma Z, et al. Free-form optical elements corrected aberrations of optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522001.
庞志海, 樊学武, 马臻, 等. 自由曲面校正光学系统像差的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522001.
- [62] Reimers J, Bauer A, Thompson K P, et al. Freeform spectrometer enabling increased compactness [J]. Light, Science & Applications, 2017, 6(7): e17026.

- [63] Reimers J, Thompson K P, Troutman J, et al. Increased compactness of an imaging spectrometer enabled by freeform surfaces[C]//Optical Fabrication and Testing 2017, July 9-13, 2017, Denver, Colorado, United States. Washington, DC: OSA, 2017: JW2C.5.
- [64] Wei L D, Feng L, Zhou J S, et al. Optical design of Offner-Chrisp imaging spectrometer with freeform surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10021: 100211P.
- [65] Marchi A Z, Borguet B. Freeform grating spectrometers for hyperspectral space applications: status of ESA programs [C]//Optical Design and Fabrication 2017, July 9-13, 2017, Denver, Colorado. Washington, DC: OSA, 2017: JTh2B.5.
- [66] Yang T, Cheng D W, Wang Y T. Freeform imaging spectrometer design using a point-by-point design method[J]. Applied Optics, 2018, 57(16): 4718-4727.
- [67] Feng L, Wei L D, Nie Y F, et al. Design of a compact spectrometer with large field of view based on freeform surface[J]. Optics Communications, 2019, 444: 81-86.
- [68] Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0808001.
- 操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0808001.