

# 非共面 Offner 结构高分辨率成像光谱仪设计

高震宇<sup>1,2</sup> 方 伟<sup>1</sup> 宋宝奇<sup>1</sup> 姜 明<sup>1</sup> 王玉鹏<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** Offner 成像光谱仪在大色散需求下成像质量不足并且易发生光线遮挡, 为此设计了一种基于罗兰圆条件的非共面 Offner 结构光谱仪。分析并推导出了一种非共面 Offner 结构成像光谱仪的消除像散及彗差同时解决光线遮挡的设计方法。使用该方法设计出光谱范围为 350~1000 nm, 色散宽度为 12.6 mm 的成像光谱仪。在奈奎斯特频率 (30 lp/mm) 下其调制传递函数在全视场、全光谱范围优于 0.78, 点列图均方根半径优于 4  $\mu\text{m}$ , 同时, 系统的谱线弯曲及谱带弯曲均小于 1% 像元尺寸。最后, 将非共面 Offner 结构成像光谱仪与传统 Offner 结构进行对比, 结果表明, 在高光谱分辨率需求下, 当入射狭缝较小时, 非共面 Offner 结构光谱仪具有更好的成像质量, 并且在谱线弯曲及谱带弯曲的控制上具有优势, 可用于小体积高光谱分辨率成像光谱仪设计。

**关键词** 光学设计; 成像光谱仪; 光谱分辨率; 像差校正; 光线遮挡

中图分类号 O433; TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0211002

## Design of Off-Plane Offner Spectrometer with High Spectral Resolution

Gao Zhenyu<sup>1,2</sup> Fang Wei<sup>1</sup> Song Baoqi<sup>1</sup> Jiang Ming<sup>1</sup> Wang Yupeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The image quality of the traditional Offner spectrometer may be unsatisfied when large dispersion is needed. Furthermore, severe ray obstruction may occur when relative aperture is not small enough. Therefore, an off-plane Offner spectrometer is suggested based on Rowland condition in this paper. An analytical design approach of an imaging spectrometer based on off-plane Offner configuration is presented. Astigmatism and coma are corrected in the design without ray obstruction. An imaging spectrometer is designed using the configuration with a spectral range from 350 nm to 1000 nm. The size of the spectral image is 12.6 mm. The modulation transfer functions in total fields of view and the whole spectral range are more than 0.78. The root mean square (RMS) spot radiuses are smaller than 4  $\mu\text{m}$ . Meanwhile, the smile and keystone of the system are both better than 1% of a pixel size. Finally, a contrast between the off-plane Offner spectrometer and the in-plane configuration is performed. The result demonstrates that the off-plane Offner spectrometer has a better image quality for high spectral resolution if a shot entrance slit is allowed. There is also an advantage in eliminating the smile and keystone. The configuration can be applied to imaging spectrometers with small dimension and high spectral resolution.

**Key words** optical design; imaging spectrometer; spectral resolution; aberration correction; ray obstruction

**OCIS codes** 220.4830; 120.4820; 300.6190; 300.6320

## 1 引 言

光谱成像是一种将光谱分析与图像处理相结合的技术, 已广泛地应用于航空航天遥感、军事侦察和农业、

收稿日期: 2015-08-13; 收到修改稿日期: 2015-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(41474161)

作者简介: 高震宇(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱仪器设计与定标等方面的研究。E-mail: lnsygy@126.com

导师简介: 方 伟(1965—), 女, 博士, 研究员, 主要从事空间太阳辐射绝对测量和遥感定标等方面的研究。

E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: ypwang\_cc@126.com

灾害监测等方面<sup>[1-3]</sup>。除此之外,在医学诊断及食品药品的质量控制中,光谱成像技术也获得了广泛应用<sup>[4-5]</sup>。在这些应用中,往往空间分辨率会影响图像的还原能力,而光谱分辨率提高将会有助于应用中的特征识别与特性分析等。因此,提高光谱分辨率对一些特定应用具有重要意义。

成像光谱仪作为光谱成像的常用设备,其常用结构包括 Czerny-Turner 结构<sup>[6-7]</sup>、Offner 结构<sup>[8-10]</sup>、Dyson 结构<sup>[11-12]</sup>及傅里叶变换光谱仪<sup>[13]</sup>等。在这些结构中,前三者均利用光栅衍射实现分光,且在其结构中光栅入射面与衍射面共面。对于入射面与衍射面非共面结构的光谱仪现有研究较少,其中 M A Gil 等<sup>[14-15]</sup>对平面光栅的非共面结构进行分析,均得出该结构的光谱仪像差较大,难以获得较好的光谱图像。而对于凸面光栅成像光谱仪,Lucke<sup>[16]</sup>最先提出非共面 Offner 结构及最佳成像圆(BIC)理论,并以此进行优化设计。之后 Prieto-Blanco 等<sup>[17-18]</sup>提出了入射面与衍射面正交的非共面 Offner 结构及一般情况下的非共面 Offner 结构光谱仪的设计方法,并基于系统光程差对像差校正过程进行分析。上述方法可用于非共面 Offner 结构成像光谱仪的参数计算,但由于并未考虑设计过程中可能出现的光线遮挡问题,部分波长及视场的光线将被光栅遮挡。

针对上述情况,本文基于罗兰圆消像差原理设计了一种改进式的非共面 Offner 结构光谱仪,可以实现大色散时全光谱范围内像差较好的校正,同时有效解决光路中的光线遮挡问题。经过理论分析,推导出一种基于该结构的消像散设计并给出了相应的设计方法。根据上述方法,设计了小体积无光线遮挡的高光谱分辨率成像光谱仪,并对设计结果进行了性能评价与仿真。最后,仿真了狭缝长度对该结构成像质量的影响,并以传统 Offner 结构光谱仪对比,得出非共面 Offner 结构在视场要求不大的条件下,对小体积大色散的高光谱分辨率系统设计具有优势。

## 2 非共面 Offner 成像光谱仪设计原理

图 1(a)为沿光轴视角的传统 Offner 光谱仪结构图,图中实线所绘的圆分别是球面反射镜和凸面光栅,光栅的刻线方向已由图中绘出。虚线所绘的圆是该系统的最佳成像圆<sup>[16]</sup>,当狭缝与像都在圆上时,可以获得成像质量较好的像。由图中可知,入射平面与衍射平面共面,狭缝中点在虚线圆上且狭缝与圆相切,当色散不大时,狭缝的像均在虚线圆附近,因此可以获得较好的成像质量,而当色散增大时,成像质量将恶化。

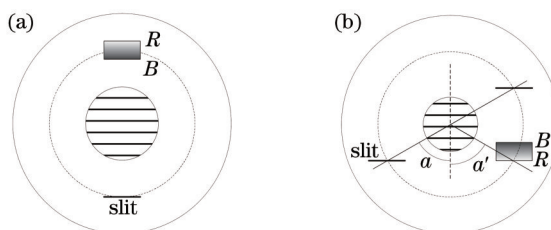


图 1 沿光轴视角的 Offner 成像光谱仪结构。(a) 共面结构; (b) 非共面结构

Fig.1 Offner spectrometer view along the optical axis. (a) In-plane configuration; (b) off-plane configuration

图 1(b)为所设计的非共面 Offner 结构图,该结构同样基于 Offner 结构,不同的是其入射面与衍射面不共面。根据像差理论,可以得到该结构最主要的残余像差是像散和彗差。由于经过光栅前后的光线不共面,光线的弧矢和子午方向均有改变,因此针对凸面光栅分析消除像散的条件十分复杂。事实上,仅从光栅方面考虑消除像散难以实现,但由于光线离轴经过球面反射镜时也会产生像散,因此尝试利用球面反射镜两次反射产生的像散对光栅产生的像散进行补偿。

设某一单色光,光栅色散方向与过狭缝中心的入射面夹角为  $\alpha$ ,与衍射面的夹角为  $\alpha'$ ,光栅的入射角为  $\theta$ ,衍射角为  $\theta'$ 。对于入射面与衍射面共面的 Offner 结构,轴外物点经过光栅衍射产生像散,其子午像满足:

$$\frac{\cos^2 \theta}{r} + \frac{\cos^2 \theta'}{r'_M} = \frac{\cos \theta + \cos \theta'}{R}, \quad (1)$$

弧矢像满足:

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{r'_S} = \frac{\cos \theta + \cos \theta'}{R}, \quad (2)$$

式中  $r$ 、 $r'_M$ 、 $r'_S$  分别是光线经过光栅的交点到物点、子午像点和弧矢像点之间的距离;  $R$  是凸面光栅的曲率

半径。当物在罗兰圆上时,其子午像也在罗兰圆上,根据罗兰圆特性,其彗差也得到校正。如果将光栅替换为球面反射镜,上式依然成立并且有  $\theta = \theta'$ 。当物点在球面反射镜的罗兰圆上,即满足  $r = R \cos \theta$  时,代入上式可得子午和弧矢像距分别为:

$$r'_M = R \cos \theta, \quad (3)$$

$$r'_s = \frac{R \cos \theta}{\cos 2\theta}, \quad (4)$$

可见,其子午像在罗兰圆上,弧矢像在罗兰圆之外。此过程可逆,即当子午和弧矢方向物分别满足(3)、(4)式时,他们的像将重合于罗兰圆一点。

对于凸面光栅,如果入射面与衍射面不共面,则(1)、(2)式不再适用,若光栅入射面与衍射面夹角为  $\alpha'$ ,可以推导得到其物像满足的条件改变为

$$\cos \theta \left( \frac{\cos \theta}{r} - \frac{1}{R} \right) \left( \frac{1 - \sin^2 \alpha' \sin^2 \theta'}{r'} - \frac{\cos \theta'}{R} \right) + \cos \theta' \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta'}{R} \right) \left( \frac{\cos \theta'}{r'} - \frac{1}{R} \right) = 0, \quad (5)$$

式中各变量与上文所述相同,当物在其罗兰圆上,即满足  $r = R \cos \theta$  时,可以得到  $r' = R \cos \theta'$  与  $r' = R / \cos \theta'$  满足上式,对于这种情况, Prieto-Blanco X 等<sup>[8]</sup>的研究表明,若子午物在罗兰圆上,其经过光栅反射后的子午像也在罗兰圆上,且该子午像不产生彗差;同时,存在一个垂直于光轴的平面,若弧矢物在该面上,其反射后的弧矢像也在该面上。根据(5)式结果可知,  $r'_s = R / \cos \theta'$  即为弧矢物像所在平面。上述结论始终成立,与光栅入射面与衍射面夹角无关。因此,针对某一波长某一视场,只要经过球面反射镜的子午像和弧矢像分别与凸面光栅的罗兰圆上子午物  $r = R \cos \theta$  及弧矢物  $r = R / \cos \theta$  重合,同时光栅出射的子午像  $r = R \cos \theta'$  及弧矢像  $r = R / \cos \theta'$  与球面反射镜反射的子午物和弧矢物重合,则经过系统后的子午像面与弧矢像面重合,可以得到该波长消除像散的像。同时,由于子午像在各元件反射过程中始终在罗兰圆上,其多次成像过程均不产生彗差,则该物点的像在校正像散的同时彗差也得以校正。

满足上述消除像散条件的光路如图2所示,其中图2(a)、(c)分别是入射面和衍射面视角,图2(b)是沿光轴截面视角。球面反射镜与凸面光栅共轴同心,且球面反射镜与凸面光栅罗兰圆分别相交于  $I_{1m}$ 、 $O_{3m}$  两点,可得经球面反射镜第一次反射的子午像和凸面光栅的子午物重合。另一方面,设定  $R_1 = R_3$  为球面反射镜曲率半径,  $R_2$  为凸面光栅曲率半径,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  分别为各面对应的入射角,  $\theta'_2$  为光栅的衍射角。为了使球面反射镜的弧矢像与凸面光栅的弧矢物重合,则需要分别满足位置及角度重合,即:

$$I_{1m} I_{1s} = R_1 \cos \theta_1 / \cos 2\theta_1 - R_1 \cos \theta_1 = R_2 / \cos \theta_2 - R_2 \cos \theta_2 = O_{2m} O_{2s}, \quad (6)$$

$$2\theta_1 = \theta_2, \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式可得

$$R_1 \sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2, \quad (8)$$

同理,凸面光栅的弧矢像与球面反射镜二次反射的弧矢物重合,可得

$$I_{2m} I_{2s} = R_2 / \cos \theta'_2 - R_2 \cos \theta'_2 = R_3 \cos \theta_3 / \cos 2\theta_3 - R_3 \cos \theta_3 = O_{3m} O_{3s}, \quad (9)$$

$$2\theta_3 = \theta'_2, \quad (10)$$

$$R_2 \sin \theta'_2 = R_3 \sin \theta_3, \quad (11)$$

根据上述公式,将其过程简化,对于凸面光栅,针对某一波长  $\lambda$ ,使  $\theta'_2 = \theta_2$ ,  $\alpha = \alpha'$ ,则经光栅出射后的光

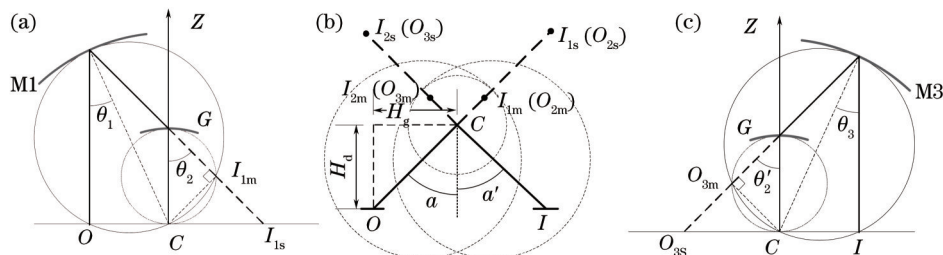


图2 非共面 Offner 光谱仪光路。(a) 入射面视角; (b) 沿光轴视角; (c) 衍射面视角

Fig.2 Schematic of off-plane Offner spectrometer. (a) Plane of incidence; (b) view along the optical axis; (c) plane of diffraction

路与入射光栅之前的光路对称,该波长的像的彗差及像散均得到良好校正,可以得到高质量的像。除此之外,当波长为0时,凸面光栅可看作球面反射镜,整个系统可以看作由三片球面反射镜组成的共面 Offner 系统,也可以获得高质量的像<sup>[7]</sup>。因此,在波长为0和 $\lambda$ 时均有高质量的像,对于在0到 $\lambda$ 范围之内波长的像,设计结果显示,其成像质量会有所下降,但依然可以满足设计需求。

### 3 非共面 Offner 成像光谱仪设计

根据上述原理,对非共面 Offner 结构成像光谱仪初始参数进行计算,由于该结构光栅入射面与衍射面不共面,因此将设计过程分为光栅色散方向及光栅刻线方向两部分,其中光栅刻线方向与光栅色散方向垂直,且该方向内角度变化不影响光栅色散。设需要设计的成像光谱仪光谱范围为 $\Delta\lambda$ ,光谱范围的色散宽度为 $h$ ,光栅常数为 $d$ ,对于光栅色散方向,计算得到凸面光栅的曲率半径为

$$R_2 = \frac{hd}{m\Delta\lambda}, \quad (12)$$

选定光谱范围上限为 $\lambda$ ,将 $\theta'_{2d} = \theta_{2d}$ 代入光栅色散方程,得

$$d(\sin\theta_{2d} + \sin\theta'_{2d}) = m\lambda, \quad (13)$$

可以得到光栅色散方向上的入射角与衍射角,进而可以得到入射狭缝上边缘视场点 $O$ 距光栅光轴色散方向上的距离为

$$H_d = R_2 \sin\theta_{2d}, \quad (14)$$

对于光栅刻线方向,由于其不影响系统色散,主要目的是消除系统中的光线遮挡,根据图2所示过程,推导可得入射狭缝边缘视场点 $O$ 距光栅光轴沿刻线方向的距离为

$$H_g \geq R_2/2F^\# + D_g/2, \quad (15)$$

式中 $F^\#$ 为系统 $F$ 数,即相对孔径的倒数, $D_g$ 是光栅刻线方向尺寸。则狭缝边缘视场点 $O$ 距光栅光轴偏移距离为

$$H = \sqrt{(H_d)^2 + (H_g)^2} = \overline{OC}, \quad (16)$$

将该结果代入(7)、(8)式则可以得到球面反射镜曲率半径 $R_1$ 。至此,综合上述公式计算得到系统全部的初始设计参数,再使用光学设计软件进行进一步优化即可完成设计。

### 4 设计实例

根据上述设计过程设计成像光谱仪,光谱范围为350~1000 nm,对应的色散宽度为12.6 mm,狭缝长度为6 mm,光栅选用400 g/mm凸面光栅,相对孔径为1/4,选用探测器像元尺寸为17  $\mu\text{m}$ 。经过优化后的光学结构如图3所示,相关设计参数如表1所示,该设计的光学尺寸约为110 mm×60 mm×40 mm, $\Sigma$ 为像面相对于光栅刻线方向夹角。

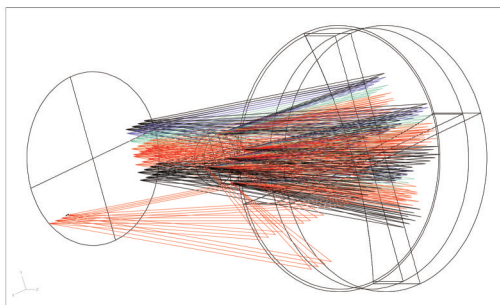


图3 非共面成像光谱仪设计图

Fig.3 3D layout of the designed off-plane Offner spectrometer

图4为该成像光谱仪系统中心波长和边缘波长的调制传递函数(MTF)曲线,由图中可知,当奈奎斯特频率为30 lp/mm情况下,该系统在全光谱范围内全视场的MTF均高于0.78,具有较好的成像质量。

表 1 非共面成像光谱仪设计参数

Table 1 Design parameter of off-plane spectrometer

Parameter	Calculated value	Optimized value
$R_2$ /mm	48.46	48.74
$\theta_{2d}$	11.54°	11.84°
$H_d$ /mm	9.69	10
$H_g$ /mm	12.24	12.4
$R_1$ /mm	95.68	96.03
$\Sigma$	0	0.267°

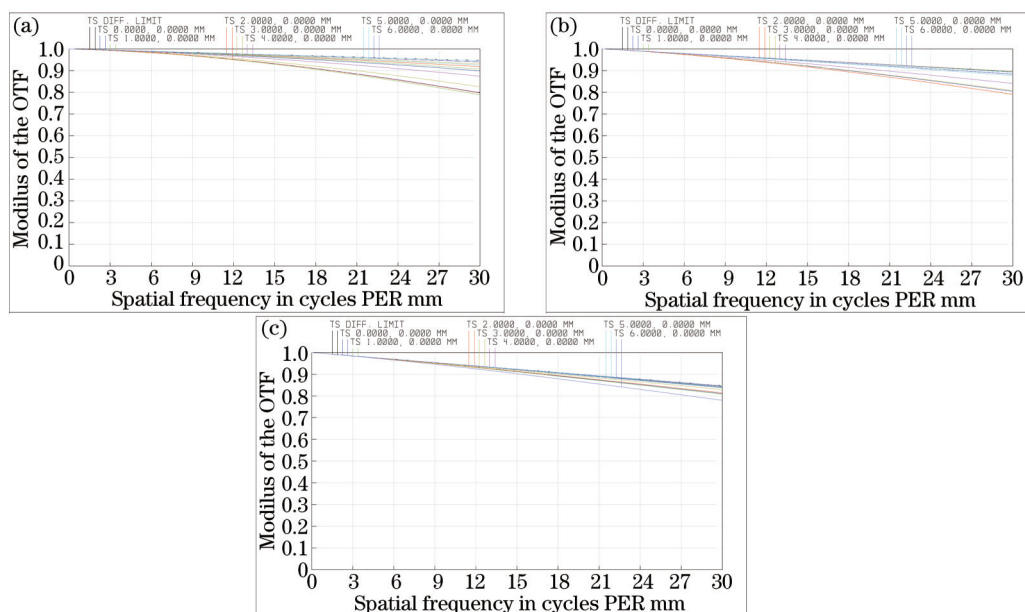


图 4 设计成像光谱仪调制传递函数曲线。(a) 350 nm; (b) 675 nm; (c) 1000 nm

Fig.4 MTF curves of the designed spectrometer. (a) 350 nm; (b) 675 nm; (c) 1000 nm

图 5 为该光谱成像系统点列图均方根(RMS)半径随波长分布曲线,可见由于像差校正过程针对最大边缘波长,因此其成像质量优于其他波长。系统 RMS 半径在全视场全波段值均小于 4  $\mu\text{m}$ ,其尺寸小于探测器像元尺寸的 1/4,满足设计要求。

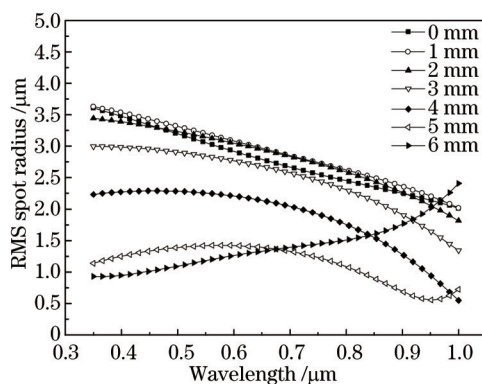


图 5 点列图均方根半径随波长变化曲线

Fig.5 RMS spot radius versus wavelength

该系统的谱线弯曲和谱带弯曲如图 6 所示,图中纵坐标分别是谱线弯曲和谱带弯曲相对探测器像元尺寸的比值,系统在全光谱范围内全视场的谱线弯曲与谱带弯曲均优于 1%像元,对定标影响几乎可以忽略。另外,与传统共面 Offner 结构不同,由于非共面 Offner 系统狭缝相对光轴不对称,因此谱线弯曲分布不具有对称性。

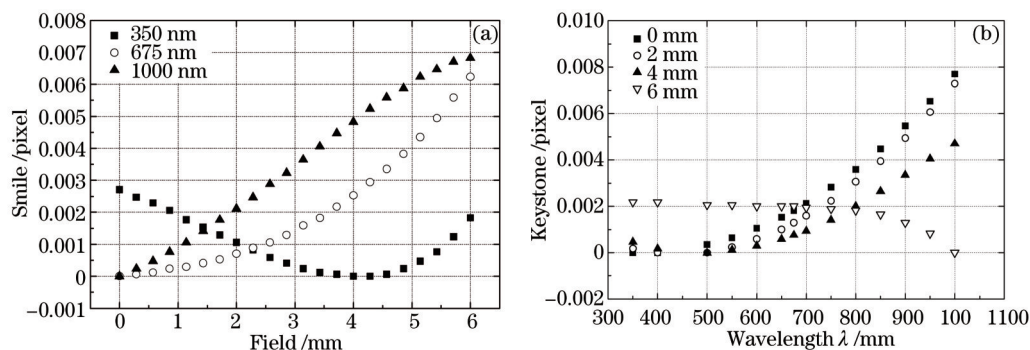


图6 系统光谱畸变。(a) 谱线弯曲; (b) 谱带弯曲

Fig.6 Spectral distortions of the system. (a) Smile; (b) keystone

由设计结果可得,非共面 Offner 成像光谱仪在入射狭缝长度较小的情况下,面对高光谱分辨率及小体积的需求,依然可以获得很好的成像质量及谱线弯曲及谱带弯曲控制。在设计要求不变的情况下,改变入射狭缝长度并进行优化,若将全光谱范围、全视场成像质量最差点点列图均方根半径作为成像质量评价标准,可得到成像光谱仪成像质量随入射狭缝长度变化的曲线如图7所示,图中除了非共面 Offner 结构成像光谱仪变化曲线外,还以传统 Offner 结构光谱仪作为对比,二者设计要求相同。由图可见,在入射狭缝较小的情况下,非共面 Offner 系统具有优势,但随着入射狭缝长度增加,该结构光谱仪成像质量会迅速降低,在大视场情况下传统 Offner 系统具有更好的成像质量。另外,除了图7所示之外,多组设计结果表明,尽管大视场情况下非共面 Offner 成像光谱仪成像质量差于传统 Offner 结构,但对谱线弯曲及谱带弯曲的控制上前者优于后者,具有更小的畸变。

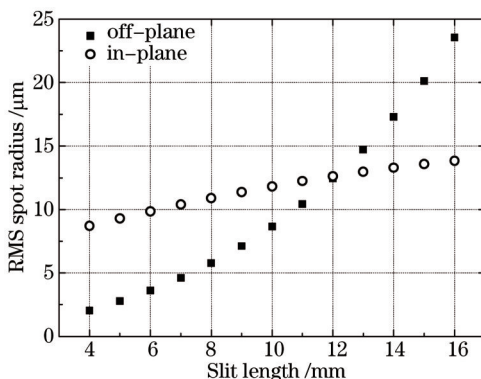


图7 共面及非共面 Offner 光谱仪成像质量随入射狭缝变化曲线

Fig.7 Imaging quality versus entrance slit length for in-plane and off-plane Offner spectrometer

## 5 结 论

基于罗兰圆原理设计了一种光栅入射面与衍射面不共面的改进型 Offner 结构成像光谱仪,一方面利用球面反射镜两次反射产生的像散补偿凸面光栅产生的像散,另一方面控制特定波长经光栅后的衍射角与入射角相等,将系统设计成对称光路来实现系统像散和彗差的校正。利用上述原理推导该结构成像光谱仪的初始参数计算公式,并使用这种结构设计了光谱范围为 350~1000 nm,色散宽度为 12.6 mm 的成像光谱仪。设计结果表明,非共面 Offner 结构成像光谱仪在 30 lp/mm 时,全视场全谱段的调制传递函数均高于 0.78,点列图均方根半径优于 4 μm,具有良好的成像质量。除此之外,光学畸变也得到了较好的控制,其谱线弯曲及谱带弯曲均优于 1% 像元尺寸。最后,仿真非共面 Offner 结构成像光谱仪成像质量随入射狭缝变化曲线,并加入了传统共面 Offner 成像光谱仪作为对比。结果显示在小体积高光谱分辨率要求下,前者在入射狭缝长度较小时可以获得更好的成像质量,随着狭缝长度增加,成像质量迅速恶化,而共面 Offner 结构在长入射狭缝时具有优势。对比结果还显示,非共面 Offner 结构具有更好的谱线弯曲及谱带弯曲校正能力。综上,所设计的非共面 Offner 结构可用于小尺寸条件下高光谱分辨率成像光谱仪的设计。

- 1 Wang Meiqin, Wang Zhonghou, Bai Jianguang. Optical design of off-axis three-mirror anastigmatic system for imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 167-172.  
王美钦, 王忠厚, 白加光. 成像光谱仪的离轴反射式光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 167-172.
- 2 Liu Yujuan, Cui Jicheng, 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.
- 3 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limbimaging spectrometer with grating dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1516-1521.  
薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1516-1521.
- 4 Carrasco O, Gomez R B, Chainani A, *et al.*. Hyperspectral imaging applied to medical diagnoses and food safety[C]. *SPIE*, 2003, 5097: 215-221.
- 5 GowenA A, Donnell C P O', Cullen P J, *et al.*. Hyperspectral imaging—an emerging process analytical tool for food quality and safety control [J]. *Trends Food Sci Techn*, 2007, 18(12): 590-598.
- 6 Tang Yi, Zheng Cheng, Nan Yibing, *et al.*. Study of anamorphose correction of astigmatism—corrected Czerny—Turner imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112007.  
唐 义, 郑 成, 南一冰, 等. 消像散型 Czerny—Turner 成像光谱仪图像变形校正研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112007.
- 7 Liu Jianpeng, Tang Yi, Huang Gang, *et al.*. Design method of optical system of improved Czerny—Turner imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322007.  
刘建鹏, 唐 义, 黄 刚, 等. 改进型 Czerny—Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322007.
- 8 Prieto—Blanco X, Montero—Orille C, Couce B, *et al.*. Analytical design of an offner imagingspectrometer[J]. *Opt Express*, 2006, 14(20): 9156-9168.
- 9 Zhang Hao, Fang Wei, Ye Xin, *et al.*. Dual—order overlapped Offner imaging spectrometer in middle—and long—wave infrared regions[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 965-974.  
张 浩, 方 伟, 叶 新, 等. 中/长波红外双衍射级次共路 Offner 成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 965-974.
- 10 Chen Wei, Zheng Yuquan, Xue Qingsheng. Optical system design of airborne wide field-of-view hyperspectral imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 1022001.  
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.
- 11 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. *Chinese J 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.
- 12 Liu Yujuan, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. A review of Dyson optical system in the measure of infrared imaging spectrum[J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2012, 32(2): 548-552.  
刘玉娟, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 红外成像光谱测量中 Dyson 光学系统的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(2): 548-552.
- 13 Liu Yang, Liao Ningfang, Bai Tingzhu, *et al.*. Study of the structure of large aperture ultraviolet Fourier transform imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0330001.  
刘 洋, 廖宁放, 白廷柱, 等. 一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪结构研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0330001.
- 14 M A Gil, J M Simon. Aberrations in off-plane spectrometers[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1983, 30(9): 1287-1301.
- 15 Wu Guoan. Design of Optical Spectrometer[M]. Beijing: Science Press, 1978: 194-196.  
吴国安. 光谱仪器设计[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 194-196.
- 16 Lucke R L. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(7): 073004.
- 17 Prieto—Blanco X, Montero—Orille C, Gonzales—Nunez H, *et al.*. The Offner imaging spectrometer in quadrature[J]. *Opt Express*, 2010, 18(12): 12756-12769.
- 18 Prieto—Blanco X, Gonzales—Nunez H, de la Fuente R. Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(11): 2332-2339.