

doi: 10.3788/gzxb20144304.0430001

# 高成像质量 Offner 成像光谱仪的理论分析与研制

韩 珊, 黄元申, 李柏承, 张大伟, 倪争技, 庄松林

(上海理工大学 光学仪器系统研究中心; 教育部及上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

**摘 要:**以双镜系统为基础构建了 Offner 成像光谱仪, 并利用光程函数来获得一种 Offner 成像光谱仪的初始结构. 通过光学设计软件 Code V 对该初始结构进行了仿真与优化, 优化后的光谱仪具有高成像质量, 其均方根点列图直径明显降低, 调制传递函数曲线在子午像与弧矢像上都获得了好的成像效果. 该研究免去了过于复杂的像差推导过程, 并在宽光谱 400~1 300 nm 条件下获得了具有高成像质量的 Offner 光谱仪结构, 为光谱仪的搭建提供了理论基础.

**关键词:**光学设计; 光学系统; 光程函数; Offner 成像光谱仪; 光谱分析

中图分类号: TH744.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0430001-5

## Theoretical Analysis and Research about High Image Quality Offner Imaging Spectrometer

HAN Shan, HUANG Yuan-shen, LI Bai-cheng, ZHANG Da-wei, NI Zheng-ji, ZHUANG Song-lin

(Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education and Shanghai;

Key Lab of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology,  
Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The Offner imaging spectrometer was built on the basis of the double mirror system, and its initial structure was obtained through solving optical path function. Through simulating and optimizing the initial structure using professional optical design software (Code V), the high image quality of spectrometer was obtained. Its root mean square spot diameter decreased obviously, and modulation transfer function curves in meridional and sagittal had good imaging results. The study can eliminate overly complex aberration derivation process, and obtain high image quality Offner spectrometer structure in a wide spectrum (400~1 300 nm). It can provide a theoretical basis for the construction of the spectrometer.

**Key words:** Optical design; Optical systems; LPF; Offner imaging spectrometer; Spectrum analysis

**OCIS Codes:** 110.0110; 080.1010; 050.1950; 300.6190

## 0 引言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代以来以光谱遥感成像技术为基础发展起来的一种能同时采集地物形貌特征和光谱特征的光学遥感仪器, 具有图谱合一性, 广泛应用在卫星遥感技术、林业、农业、地质、医药、军事、海

洋、地质勘探、生产制造、色度学、生态学等相关领域<sup>[1-3]</sup>. 而在各类型成像光谱仪中, Offner 成像光谱仪因其完美的光学特性, 使它受到了更为广泛的关注.

Offner 成像光谱仪是建立在全反射式 Offner 两镜同心成像系统之上的, 该系统具有结构简单、体积小、采用两个同心球面反射镜来消除赛德尔像差的良好光

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 61176085, 11105149)、国家科技支撑计划(No. 2011BAF02804)、国家重大科学仪器设备开发项目(No. 2011YQ15004004)、上海市教委曙光项目(No. 11SG44)、上海市超精密光学加工与检测服务平台建设(No. 11DZ2290301)、上海市重点学科建设项目(No. S30502)、高等学校博士学科点专项科研基金(No. 2012312013000)和上海市研究生创新基金(No. JWCXSL1302)资助

**第一作者:**韩珊(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为凸面衍射光栅. Email: hanshangf@126.com.

**导师(通讯作者):**黄元申(1963-), 男, 教授, 主要研究方向为机械刻划光栅、亚波长光栅. Email: hyshyq@sina.com

**收稿日期:**2013-07-22; **录用日期:**2013-12-02

<http://www.photon.ac.cn>

学特性. 将该系统中的凸球面镜换成凸球面光栅, 就得到 Offner 成像光谱仪结构. 为了能够提高 Offner 成像光谱仪的成像质量, 近些年来, 许多国内外的研究人员都对 Offner 成像光谱仪结构进行了详细的分析, 其中 X. Prieto-Blanco<sup>[4]</sup> 等人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的条件下, 使子午和弧矢聚焦曲线在某一中心波长下相切, 使设计方法简单、迅速. 随后, 2007 年 Robert L. Lucke<sup>[5]</sup> 提出了一种平面外色散的 Offner 光谱仪. 对于一个短狭缝系统可以使色散在所谓 BIC (the best imaging circle) 附近得到好像质的光谱像. X. Prieto-Blanco 又对这种系统进行了深入研究. 在一个正交结构中, 即入缝和出缝在两个互相垂直的平面内, 可以实现消像散结果, 获得较好的成像质量<sup>[6-9]</sup>. 与此同时, 国内的许多学者也对此结构进行了相关研究, 如上海理工大学在近几年就对该结构的分析与设计做了大量的研究<sup>[10-12]</sup>, 应用波像差理论得到了一个消除了三次和五次像差的“无”像差环视场. 该研究只是针对主光线垂直于物像平面的情况, 没有考虑光源的孔径角, 光谱范围是在 400~700 nm 之间. 苏州大学也对该结构进行了一系列深入的研究<sup>[13-15]</sup>, 其中应用到了平面对称系统波像差理论, 并通过对该理论的计算得出 Offner 成像光谱仪分光系统子午与弧矢离焦像差系数与结构参量的关系式, 并分析了像散特性, 给出了对一个波长的消像散条件, 以及得到系统初始结构的过程.

本文以双镜系统为基础, 采用求解光程函数法, 获得一种 Offner 成像光谱仪的初始结构, 用专业光学设计软件对该结构进行仿真优化, 避免了复杂的像差推导与计算, 得到具有高成像质量的 Offner 成像光谱仪.

## 1 Offner 成像光谱仪的结构分析

Offner 两镜同心成像系统首先是由 Thevenon 提出的, 随后 Fisher, Chrisp 和 Mouroulis 等人<sup>[16-17]</sup> 又分别对此型分光系统进行了不同的设计. 1987 年, D. Kwo<sup>[18]</sup> 等人提出基于 Offner 成像系统的光栅成像光谱仪, 在消除第三级像差方面取得了理想的效果, 但要消除第五级像散则需要通过使用像差矫正光栅或者将光栅略微倾斜的方法, 这就会使系统失去原有的对称性, 带来彗差.

1999 年 M. P. Chrisp<sup>[16]</sup> 等针对此缺点进行了改进, 将大凹球面镜分成两个小凹球面镜, 重新获得同心结构并采用罗兰圆配置, 使得光谱成像系统更具小型化和轻量化. 图 1 为 Offner 成像光谱仪结构, 包括一个点光源 S, 两个球面反射镜  $M_1$  和  $M_2$ , 一个凸面光栅 G, 一个像点 I. 其中  $M_1$ ,  $M_2$  和 G 拥有同一个球心 C,

即为三同心光学系统.  $M_1$ ,  $M_2$ , G 在顶点处的法线与 S 点共平面, 光栅 G 的刻线方向垂直于该平面. 示意图中只画出了入射主光线 (波长为  $\lambda$ )  $SO_1$  经  $M_1$  反射到达 O 点, 主光线  $O_1O$  经 G 衍射后的  $M_2$  级光到达  $O_2$  点, 衍射主光线  $OO_2$  经  $M_2$  的反射光线最后到达像平面上的 I 点. 距离  $SO_1$ ,  $O_1O$ ,  $OO_2$ ,  $O_2I$  以及主光线  $SO_1$ ,  $O_1O$ ,  $OO_2$  的入射角、光栅 G 的衍射角, 称为 Offner 成像光谱仪的结构参量.

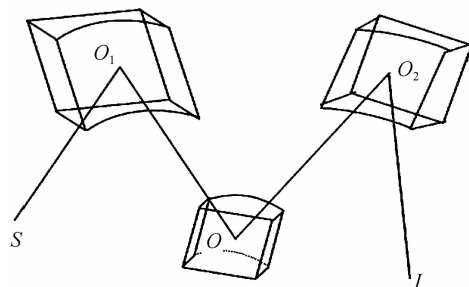


图 1 Offner 成像光谱仪结构

Fig. 1 Offner imaging spectrometer structure

## 2 Offner 成像光谱仪的像差理论分析

采用波相差分析了 Offner 成像光谱仪的像差理论, 波相差反映的是实际波面与理想波面之间的偏差, 定义为光线在两波面间的光程长度. 哈密顿发展了非常完善的像差分类理论, 从特征函数的定义出发, 应用光学系统的旋转对称性说明仅某些项可能出现. 这些项所对应的球差、彗差等, 就是要计算和测量的光学系统的像差<sup>[11]</sup>. 例如用特征函数, 对光程函数的变量选取和分类展开式的推导. 但是其相关研究的光谱范围较小, 只在 400~1 000 nm 之间, 而且没有考虑孔径角的影响. 苏州大学应用平面对称系统波像差理论来分析求解, 但其计算过程趋于复杂; X. Prieto - Blanco 等人, 采用求解光程函数<sup>[6-9]</sup>法进行讨论, 在凹面光栅基础上完成相关计算, 再将其应用到 Offner 成像光谱仪结构中. 本文直接以凸面光栅为基础, 得出 Offner 成像光谱仪的光程差表达式, 为方便起见, 以两镜系统为例进行分析, 如图 2.  $\theta$ ,  $\varphi$  分别为主光线在凹面镜上的入射角和经光栅衍射后在凹面镜上的入射角,  $\alpha$ ,  $\beta$  为主

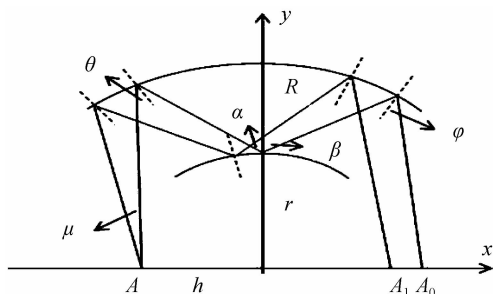


图 2 Offner 成像光谱仪像差理论分析示意

Fig. 2 Aberration theory schematic of Offner imaging spectrometer

光线在光栅上的入射角、衍射角; $\theta'$ 、 $\varphi'$ 、 $\alpha'$ 、 $\beta'$ 为任意光线对应的各角度(图中未标出); $\mu$ 为孔径角; $h$ 为物点高度; $R$ 为凹面镜半径, $r$ 为光栅半径。

由图 2 可得光程函数的表达式为

$$F = \overline{AA_1} - \overline{AA_0} + n\lambda N(X, Y) \quad (1)$$

式中 $\overline{AA_1}$ 为任意光线的物点到像点的光程; $\overline{AA_0}$ 为主光线的物点到像点的光程; $N(X, Y)$ 为光栅刻线函数; $n$ 取整数.通过几何关系计算,可以得出

$$\overline{AA_0} = R \cos \theta + \frac{r}{\sin \theta} \sin(\alpha - \theta) + \frac{r}{\sin \varphi} \sin(\beta - \varphi) + \frac{R \cos(2\theta - \alpha - \beta - \varphi)}{\cos(\alpha + \beta - 2\theta - 2\varphi)} \quad (2)$$

$$\overline{AA_1} = \frac{R \cos(\theta' + \mu)}{\cos \mu} + \frac{r}{\sin \theta'} \sin(\alpha' - \theta') + \frac{r}{\sin \varphi'} \sin(\beta' - \varphi') + \frac{R \cos(2\theta - \alpha - \beta + \mu + \varphi)}{\cos(\alpha + \beta - \mu - 2\theta - 2\varphi)} \quad (3)$$

在图 2 中应用正弦定理以及光栅布喇格公式可以得出

$$\begin{cases} \frac{\sin(90^\circ + \mu)}{R} = \frac{\sin \theta'}{h} \rightarrow \sin \theta' = \frac{h \cos \mu}{R} \\ \frac{\sin 90^\circ}{R} = \frac{\sin \theta}{h} \rightarrow \sin \theta = \frac{h}{R} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\sin(\pi - \alpha')}{R} = \frac{\sin \theta'}{r} \rightarrow \sin \alpha' = \frac{R \sin \theta'}{r} \\ \frac{\sin(\pi - \alpha)}{R} = \frac{\sin \theta}{r} \rightarrow \sin \alpha = \frac{R \sin \theta}{r} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\sin(\pi - \beta')}{R} = \frac{\sin \varphi'}{r} \rightarrow \sin \varphi' = \frac{r \sin \beta'}{R} \\ \frac{\sin(\pi - \beta)}{R} = \frac{\sin \varphi}{r} \rightarrow \sin \varphi = \frac{r \sin \beta}{R} \end{cases} \quad (6)$$

$$d(\sin \alpha - \sin \beta) = k\lambda \quad (7)$$

$$d(\sin \alpha' - \sin \beta') = k\lambda \quad (8)$$

将式(4)~(8)分别带入式(1),并应用和差化积等三角函数公式计算,可得

$$F = \overline{AA_1} - \overline{AA_0} + n\lambda N(X, Y) = \frac{\cos \mu}{R} (\sqrt{R^2 - h^2 \cos^2 \mu} - h \sin \mu) + \sqrt{R^2 - h^2 \cos^2 \mu} - \sqrt{r^2 - h^2 \cos^2 \mu} + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \beta'} - r \sqrt{1 - \sin^2 \beta'} - (2 \sqrt{R^2 - h^2} - \sqrt{r^2 - h^2} + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2 \beta} - r \sqrt{1 - \sin^2 \beta}) - 2r \sin \mu \sin \beta / [\cos \mu - \sin(\alpha + \beta - \mu - 2\theta - 2\varphi)] \cdot \sin(\alpha + \beta - \mu - 2\theta - 2\varphi) + n\lambda N(X, Y) \quad (9)$$

为了获得使  $F$  取得最小值的初始结构,取 $\mu = 10^\circ$ ;  $R = 150$  mm;  $h = 15$  mm;将各参量值代入式(9),通过计算以及 Matlab 软件仿真求出使  $F$  取得最小值的  $r$  值为 73 mm.计算得从物点到凹面镜的垂直距离为 149.248 mm,凹面镜到光栅的距离为 77 mm.以计算值为初始结构参量,通过 Code V 软件对其进行仿真与优化,得到具有高成像质量的 Offner 成像光谱仪。

### 3 Offner 成像光谱仪性能分析

将表 1 中各结构参量输入 Code V 软件进行模拟,其中厚度代表前表面到后表面的距离。

表 1 Offner 成像光谱仪初始结构参量

Table 1 Offner imaging spectrometer parameters of the initial structure

Surface	Radius	Thickness
Object	—	149.248
Concave	150	77
Grating	73	77
Concave	150	149.248

图 3 是仿真结果.对应波长的均方根(Root Mean Square, RMS) spot diam 值见表 2.

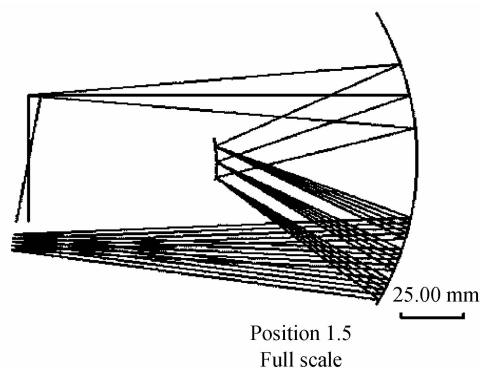


图 3 Offner 结构的分光示意

Fig. 3 Spectral schematic of Offner imaging spectrometer

表 2 对应波长的 RMS 值

Table 2 RMS values correspond to the wavelengths

Wavelength/nm	400	700	1 000	1 300	1 600
RMS/ $\mu$ m	16.404	15.357	16.971	19.512	23.392

图 4 为所生成的相应的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线.从图 4 可以看出,对应的子午与弧矢像的成像质量都与极限值具有一定的偏差。

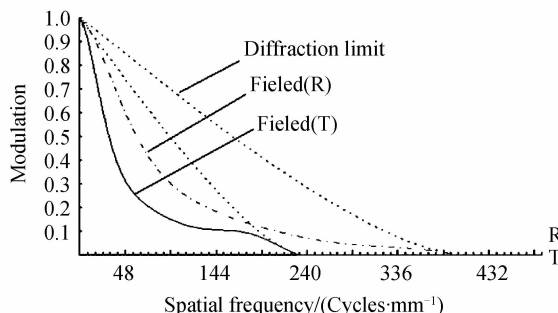


图 4 MTF 曲线图

Fig. 4 MTF curves

由获得的仿真结果可以看出,由前面的初始结构并不能得到较好的成像质量,因此需要应用 Code V 软件对其进行优化.由于 Code V 软件具有自动优化功能,可以将各结构参量设成变量,再在自动优化功能中

添加限制条件来获得满意的优化结果. 并通过获得的均方根点列图直径(Root Mean Square spot diameter, RMS spot diameter)值以及 MTF 曲线来对成像质量进行评估.

图 5 为优化后得到的结果. 将各结构参量设为变量, 通过 Code V 软件进行优化后可以得到最优成像质量对应的一组结构参量, 如表 3. 优化后的各参量都出现了改变, 最直观的为物像平面出现了分离.

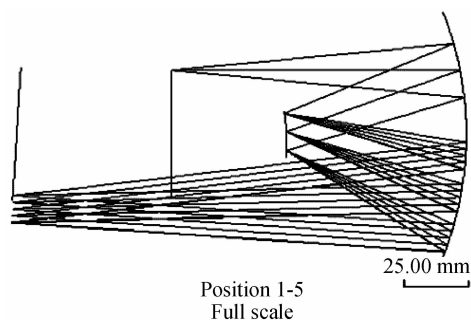


图 5 Offner 结构的分光示意图(优化后)

Fig. 5 Spectral schematic of Offner imaging spectrometer (optimized)

表 3 优化后的光谱仪结构参量

Table 3 The optimized structure parameters of spectrometer

Surface	Radius	Thickness
Object	—	123.893 3
Concave	160.873 9	75.708 3
Grating	88.738 0	75.708 3
Concave	160.113 9	189.352 8

通过与优化前所成像的 RMS spot diameter 值及 MTF 曲线的比较, 可以明显看出成像质量的提高, 表 4 即为各数据值.

表 4 优化后对应波长的 RMS 值

Table 4 The optimized RMS values correspond to the wavelengths

Wavelength/nm	400	700	1 000	1 300	1 600
RMS/ $\mu\text{m}$	0.49	0.45	0.35	0.40	1.32

可以看出与优化之前相比, RMS spot diameter 值明显减小, 但通过观察可以发现, 对应 1 600 nm 处的 RMS 接近 1 300 nm 处 RMS 值的三倍, 这会大大降低仪器的光谱分辨率<sup>[19-20]</sup>, 由于光谱分辨率也是决定光谱仪质量的重要指标. 因此, 为了获得高质量的成像光谱仪, 需要将光谱范围改为 400~1 300 nm 为最佳. 所生成的 MTF 曲线, 如图 6.

可以看出, 对于优化后的 Offner 成像光谱仪的成像, 无论是子午像还是弧矢像, 都接近于自身的衍射极限. 由此可知, 通过将得出的初始结构代入到 Code V 软件中, 进行仿真与优化, 就可以获得高质量 Offner 成像光谱仪, 并可以通过 RMS spot diameter 值以及 MTF 曲线对其成像质量进行综合评估, 而不用对各种

像差进行复杂的分析, 而且 Code V 软件的自动优化功能方便快捷, 对设计工作提供了很大帮助.

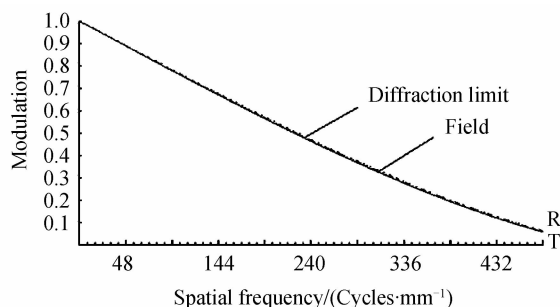


图 6 MTF 曲线图(优化后)

Fig. 6 MTF curves(optimized)

## 4 结论

随着空间技术的发展, 具有高成像质量的光谱仪器越来越受到人们的关注. 因此, 新型 Offner 结构成像光谱仪的出现, 引起了学者的足够重视, 它采用凸面光栅, 反射镜和光栅的同心光路, 结构极为简单, 重量轻, 体积小并且具有高的光谱分辨能力. 但是, 由于光学元件存在像差, 影响成像质量, 因此, 必须对其结构进行消像差优化设计. 本文中采用光程函数的方法, 首先获得一种 Offner 成像光谱仪的初始结构, 然后通过专业的光学设计软件, 对该初始结构进行仿真与优化, 并对其成像质量进行了分析, 免去了过于复杂的计算及像差的推导过程, 在宽光谱(400~1 300 nm)条件下获得了具有高成像质量的 Offner 成像光谱仪结构, 为后续的光谱仪的搭建提供了可靠的依据.

### 参考文献

- [1] ZHENG Yu-quan. Design of compact offnerspectral imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(6): 650-656.  
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): 650-656.
- [2] ZHU Shan-bing, JI Yi-qun, GONG Guang-biao, et al. Optical design of prism-grating-prism imaging spectrometers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2270-2273.  
朱善兵, 季轶群, 宫广彪, 等. 棱镜-光栅-棱镜光谱成像系统的光学设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2270-2273.
- [3] LIU Wei. Design and analysis of structure of compact Offner spectral imaging system[J]. *Chinese Journal of 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*, 2010, **3**(2): 157-163.
- [4] PRIETO B X, MONTERO O C, COUCE B, et al. Analytical design of an offner imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(20): 9156-9168.
- [5] LUCKE R L. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer [J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(7): 0730041-0730044.
- [6] PRIETO B X, MONTERO O C, GONZALEZ N H, et al. Imaging with classical spherical diffraction grating: the quadrature configuration [J]. *Optical Society of America*, 2009, **26**(11): 2400-2409.

- [7] PRIETO B X, MONTERO O C, GONZALEZ N H, *et al.* The offner imaging spectrometer in quadrature [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12756-12769.
- [8] PRIETO B X, GONZALEZ N H, FUENTE R. Off-plane anastigmatic imaging in offner spectrometer [J]. *Optical Society of America*, 2011, **28**(1): 2232-2239.
- [9] HECTOR G N, XESUS P B, FUENTE R. Pupil aberrations in offner spectrometers [J]. *Optical Society of America*, 2012, **29**(4): 442-449.
- [10] HUANG Yuan-shen, NI Zheng-ji. 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.
- [11] HUANG Yuan-shen, NI Zheng-ji, ZHUANG Song-lin. 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.
- [12] HUANG Yuan-shen, CHEN Nan-shu, ZHANG Da-wei, *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.
- [13] JI Yi-qun, SHEN Wei-min. Design and manufacture of offner convex grating hyper-spectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 258-287.  
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): 258-287.
- [14] JI Yi-qun, GONG Guang-biao, ZHU Shan-bing, *et al.* Minimal integrated hyperspectral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 727-731.  
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.
- [15] XUE Ru-dong, JI Yi-qun, SHEN Wei-min. Design of a spectroscopic system for SWIR offner imaging spectrometer [J]. *Journal of Suzhou University (Natural Science Edition)*, 2011, **27**(3): 61-66.  
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.
- [16] CHRISP M P. Convex diffraction grating imaging spectrometer: US, 5880834 [P]. 1999-05-09.
- [17] MOUROULIS P. Compact infrared spectrometers [C]. Orlando: infrared technology and applications XXXV, 2009.
- [18] KWO D, LAWRENCE G, CHRISP M. Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system [C]. SPIE, 1987, **818**(11): 275-279.
- [19] XUE Qing-sheng, LIN Guan-yu, SONG Ke-fei. Optical design of spaceborne shortwave infrared imaging spectrometer with wide field of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 673-678.  
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.
- [20] YUAN Li-yin, HE Zhi-ping, SHU Rong, *et al.* Optical design of a SWIR PGP imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 831-834.  
袁立银,何志平,舒嵘,等.短波红外棱镜-光栅-棱镜成像光谱仪光学系统设计[J].*光子学报*, 2011, **40**(6): 831-834.