

文章编号: 0253-2239(2010)04-1148-05

Offner 成像光谱仪的设计方法

佟亚军^{1,2} 吴刚³ 周全³ 杜学维⁴ 马智宏⁵ 肖体乔¹ 王秋平⁴

¹ 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049

³ 中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230029; ⁴ 中国科学技术大学国家同步辐射实验实, 安徽 合肥 230029

⁵ 北京市农林科学院国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089

摘要 基于子午和弧矢聚焦曲线给出了一种 Offner 型成像光谱仪的新的设计方法。该方法不但适用于三同心元件 Offner 型成像光谱仪, 还适用于传统的两同心元件 Offner 成像光谱仪的设计, 更重要的是该方法还可以灵活地以商品化标准光学元件为基础进行优化设计, 克服了已有方法的复杂性与单一针对性。给出了采用该方法分别在子午和弧矢聚焦曲线相切、两点相交和已知元件参数进行优化的设计流程。并利用该设计流程给出了已知元件参数进行优化设计实例, 在相对孔径 $f/3.2$ 时, 在 $400\sim 1000$ nm 波长范围内可以得到最大的光斑半径的均方根值仅为 $2.3\ \mu\text{m}$ 的追迹结果, 这一数值在 1000 nm 时已经达到了衍射极限。采用上述设计参数成功研制出了一台成像光谱仪, 经初步测试达到各项设计指标。

关键词 光学设计; Offner; 成像光谱仪; 优化设计; 遥感

中图分类号 TH 744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1148

Design Method of Offner-Type Imaging Spectrometer

Tong Yajun^{1,2} Wu Gang³ Zhou Quan³ Du Xuewei⁴

Ma Zhihong⁵ Xiao Tiqiao¹ Wang Qiuping⁴

¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230029, China

⁴ National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230029, China

⁵ National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100089, China

Abstract A new design approach about Offner-type imaging spectrometer is presented based on the relation between the meridional focusing curve and the sagittal focusing curve. It can be not only applied to the Offner-type spectrometer with the three concentric components, but also the traditional Offner-type spectrometer with two concentric components. What's more, it can be flexibly optimized based on existing components, which overcomes the complexity and pertinence of the existing methods. The procedures of the tangency and intersection relations of the meridional and sagittal focusing curves and the design of existing components are shown. An example of optimization design with the existing components is presented. With the relative aperture of $f/3.2$, the smallest RMS spot radius of $2.3\ \mu\text{m}$ at the wavelength range of $400\sim 1000$ nm can be achieved, which is very close to the diffraction limit at the wavelength of 1000 nm. An imaging spectrometer is developed successfully using the above parameters, which can achieve the indexes after preliminary test finally.

Key words optical design; Offner; imaging spectrometer; optimization; remote sensing

收稿日期: 2009-07-02; 收到修改稿日期: 2009-07-16

基金项目: 国家 863 计划(2007AA10Z202)资助课题。

作者简介: 佟亚军(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事同步辐射光学工程方面的研究。E-mail: tongyajun@sinap.ac.cn

导师简介: 王秋平(1963—), 男, 研究员, 主要从事分光系统的光学设计、结构设计和系统调试等方面的研究。

E-mail: qiuping@ustc.edu.cn

1 引言

成像光谱仪是一种可同时采集地物形貌特征和光谱特征的光谱仪器,可以用来实现精确测绘、目标识别和确认、目标检测、过程监控、临床诊断成像、环境评估和管理等任务,广泛应用于卫星遥感、林业、地质、海洋、医药、生产制造、生态学和军事等领域^[1~8]。

根据成像光谱仪的基本原理,它可以分为波长扫描型和空间扫描型两种。前者是对准一个固定空间区域(面)用不同的波长进行照相,每一时刻记录一个固定波长的单色照片,通过改变波长,得到固定空间范围内的全部光谱信息。后者通过扫描空间(点或线),每一时刻记录该空间范围的全部光谱信息,通过图像拼接,完成全部空间范围内的光谱信息收集。波长扫描型和空间扫描型成像光谱仪各有特点,本文讨论空间扫描型成像光谱仪的优化设计。

在空间扫描光谱仪中,Offner 成像光谱仪是一个很有特点的系统。它是通过空间线扫描(推扫式成像)每一时刻对目标物的一个狭长空间进行全部的光谱记录。适合于观测目标和光谱仪之间有相对运动的体系,比如:星载或机载光谱观测系统(光谱仪运动),生产线上物体的检测(目标运动,光谱仪不动)。

Offner 成像系统^[9]是一种同心三反射光学系统,结构简单、体积小,采用两个同心球面反射镜消除了赛德尔(Seidel)像差,具有良好的光学特性。1987年 D. Kwo 等^[10]提出了基于 Offner 成像系统的光栅成像光谱仪,该光谱仪由一个大凹球面镜和一个同心的凸球面光栅组成。这种设计保证所有第三级像差为零,仅存在第五级像散。消除第五级像散需要采用像差矫正光栅或者将凸面光栅轻微倾斜,但是任何倾斜都会造成系统的不对称性,带来彗差。1999年 M. P. Chrisp 等^[11]对其进行了改进,把大凹球面镜换成两个小凹球面镜分别作为接收狭缝入射光和光栅衍射光的元件,这就可以通过改变两球面镜的半径来增加设计的自由度,采用同心结构和罗兰圆配置,解决了传统光谱仪的谱线弯曲和色畸变的问题,得到了平场的弧矢与子午焦面,实现了光谱成像系统的小型化和轻量化。

二十年来,国内外的研究人员^[12~21]对 Offner 成像光谱仪进行了详细的分析,提出了不同的设计,使其在相关领域得到了发展和应用。但是对于该光谱仪的设计方法多是比较复杂且要依靠光学追迹软件,直到 2006年 X. Prieto-Blanco 等^[22]提出了一种基于子午和弧矢聚焦曲线的简单设计方法,该方法首先保证三元件同心和罗兰圆的配置,然后使子午

和弧矢聚焦曲线在某一中心波长下相切。该方法简单而迅速,但作者只分析了两曲线相切的一种情况,认为曲线之间两点相交情况会更好,但是其它位置关系计算比较复杂。并且没有清晰的给出聚焦曲线的形状,采用文献中的方法也无法对于已有元件参数进行优化设计。

本文受到 X. Prieto-Blanco 等^[22]设计方法的启发,首先采用基本的成像公式给出了 Offner 成像光谱系统的子午、弧矢聚焦曲线计算方法;然后分别在子午和弧矢聚焦曲线相切、两点相交和已知元件参数三种情况给出了设计流程;最后,在考虑成本的情况下,根据现有条件采用该方法优化了一套参数,设计了一台成像光谱仪,给出了初步实验结果。

2 Offner 成像光谱仪聚焦曲线计算方法

对于推扫式成像光谱仪必须保证入射狭缝经过光栅衍射成在探测器上的像在狭缝长度方向上有出色的空间分辨,在垂直于狭缝的方向上有出色的光谱分辨,这就需要解决三个问题^[3]:

- 1) 像面上光谱范围内消除像散;
- 2) 消除像面上光谱的场曲;
- 3) 在入射狭缝长度方向上获得好的空间分辨,也就要求狭缝上不同的点所对应的视场角上消除像散。

对于 Offner 成像光谱仪,由于其同心结构的优越特性,只要能够通过调整参数解决问题 1),即在光谱范围内消除几何像散,就可以在一定的范围内很好的解决所有问题,得到优异的结果。下面就问题 1)进行分析探讨。

该 Offner 系统的设计有两个前提条件:三元件同心;成像符合罗兰圆。这两个条件保证了系统的对称性,使其不受彗差的影响^[3],原理图如图 1 所

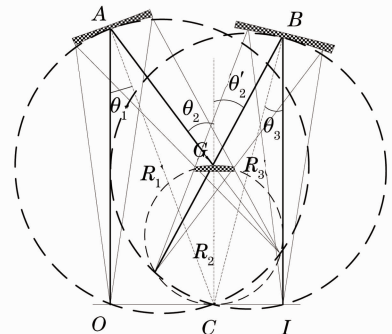


图 1 成像光谱仪示意图

Fig. 1 Schematic of the imaging spectrometer

示, C 为三元件共同的球心, 光栅刻线方向垂直于主平面, O 为入射狭缝中心点, I 为 O 在某一波长下的像点, A, G, B 分别为中心波长的主光线在三光学元件上的入射点, 设 R_1, R_3 分别为凹球面镜 M_1, M_3 的半径, R_2 为凸面光栅 M_2 的半径, θ_2, θ'_2 为光栅的入射角和衍射角, 两球面镜的入射角等于出射角分别为 θ_1, θ_3 。对于该系统只需要确定 R_1, R_2, R_3, θ_2 , 光栅线密度 n , 衍射级次 m 这样 6 个参数就可以确定整个结构。

由文献[22]可知凸面光栅半径 R_2

$$R_2 = h_{\text{spec}} / (m n \Delta \lambda), \quad (1)$$

式中 h_{spec} 为设计所要求的光谱色散宽度, m 为衍射级次, n 为光栅线密度, $\Delta \lambda$ 为光谱范围。

θ_2 是由(2)式来确定的

$$\theta_2 \approx \arcsin \left\{ n m \bar{\lambda} + \sin \left[\arctan \left(\frac{1}{F} + \frac{h_{\text{spec}} + s}{R_2} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 F 为相对孔径, s 为光栅不挡光的冗余值, $\bar{\lambda}$ 为中心波长, 在光学系统子午方向主平面内, 根据正弦定理求 $\theta_1, l_{AG}, \theta_3$ 和 l_{GB} , 即

$$\sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2 / R_1, \quad (3)$$

$$l_{AG} = \frac{R_1 \sin(\theta_2 - \theta_1)}{\sin \theta_2}. \quad (4)$$

根据光栅方程

$$\sin \theta'_2 = \sin \theta_2 - m n \lambda, \quad (5)$$

$$\sin \theta_3 = R_2 \sin \theta'_2 / R_3, \quad (6)$$

$$l_{GB} = \frac{R_3 \sin(\theta'_2 - \theta_3)}{\sin \theta'_2}. \quad (7)$$

考虑狭缝的中心点在子午方向上 M_1, M_2 和 M_3 的物、像都在罗兰圆上, 所以 M_3 的子午像距为

$$r'_{M3} = R_3 \cos \theta_3. \quad (8)$$

设 C 点为 $(0, 0)$, 过光栅中心的罗兰圆直径为 y 轴方向, 与 y 轴垂直方向为 x 轴方向。则 B 点坐标 $[R_3 \sin(\theta'_2 - \theta_3), R_3 \cos(\theta'_2 - \theta_3)]$ 。

设 M_3 的子午焦点为 $I_M(X_{IM}, Y_{IM})$,

则根据几何关系推导出

$$X_{IM} = R_3 \sin(\theta'_2 - \theta_3) + r'_{M3} \sin(2\theta_3 - \theta'_2), \quad (9)$$

$$Y_{IM} = R_3 \cos(\theta'_2 - \theta_3) - r'_{M3} \cos(2\theta_3 - \theta'_2). \quad (10)$$

弧矢方向聚焦要对三个元件依次分析:

$$\frac{1}{R_1 \cos \theta_1} + \frac{1}{r'_{S1}} = \frac{2 \cos \theta_1}{R_1}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{r'_{S1} - l_{AG}} + \frac{1}{r'_{S2}} = \frac{\cos \theta_2 + \cos \theta'_2}{R_2}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{r'_{S2} + l_{GB}} + \frac{1}{r'_{S3}} = \frac{2 \cos \theta_3}{R_3}. \quad (13)$$

解出 M_3 弧矢像距

$$r'_{S3} = 1 / \left(\frac{2 \cos \theta_3}{R_3} - \frac{1}{r'_{S2} + l_{GB}} \right), \quad (14)$$

则根据几何关系推导出弧矢焦点 $I_S(X_{IS}, Y_{IS})$:

$$X_{IS} = R_3 \sin(\theta'_2 - \theta_3) + r'_{S3} \sin(2\theta_3 - \theta'_2), \quad (15)$$

$$Y_{IS} = R_3 \cos(\theta'_2 - \theta_3) - r'_{S3} \cos(2\theta_3 - \theta'_2). \quad (16)$$

给定一套参数后通过(3)~(16)式的过程即可求得在某一波长 λ 下子午焦点和弧矢焦点的坐标, 以 λ 为自变量即可得到狭缝中心点的子午聚焦曲线和弧矢聚焦曲线。两曲线的位置关系决定了 Offner 成像光谱仪的成像质量。

3 设计方法

当给定 $n, m, F, h_{\text{spec}}, \Delta \lambda, \bar{\lambda}$, (1)~(16)式就可以作为设计方法进行光谱仪的优化设计。

当要求子午和弧矢聚焦曲线在某一波长下相切时, 可以设 λ_1 为两聚焦曲线相切点的波长, $\lambda_1 - \Delta$ 和 $\lambda_1 + \Delta$ 分别为与 λ_1 相差 Δ 小量的相邻波长, 那么两聚焦曲线相切的条件为

$$|r'_{M3-} - r'_{S3-}| = 0, \quad (17)$$

并且

$$(r'_{M3-} - r'_{S3-}) \times (r'_{M3+} - r'_{S3+}) > 0, \quad (18)$$

根据以上的分析具体设计流程如图 2 所示。

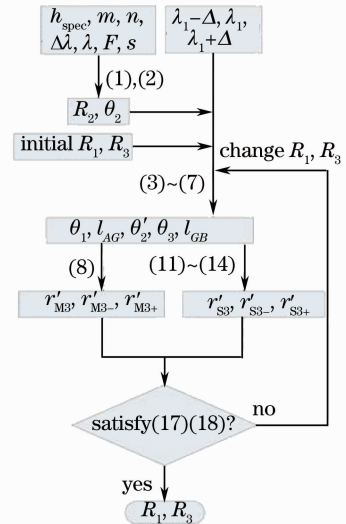


图 2 子午和弧矢聚焦曲线相切设计流程

Fig. 2 Design procedure of tangency of meridional and sagittal focusing curve

当要求子午和弧矢聚焦曲线在两波长下相交时, 可以设 λ_2, λ_3 为相交波长, 则须满足在两波长下子午和弧矢像距均相等, 即

$$|r'_{M31} - r'_{S31}| = 0, \quad (19)$$

并且

$$|r'_{M32} - r'_{S32}| = 0, \quad (20)$$

设计流程只需把图 2 中判断条件替换为(19), (20)式即可。

在进行成像光谱仪设计时,当成本需要优先考虑时,会选择购买商品化标准光学元件,而不是专门定制,这就需要在现有备选元件下对该结构进行优化。本文所提出的设计过程同样满足这样的优化要求,以 θ_2 为变量,也就是在允许的对 F 进行优化。设计流程如图 3 所示。

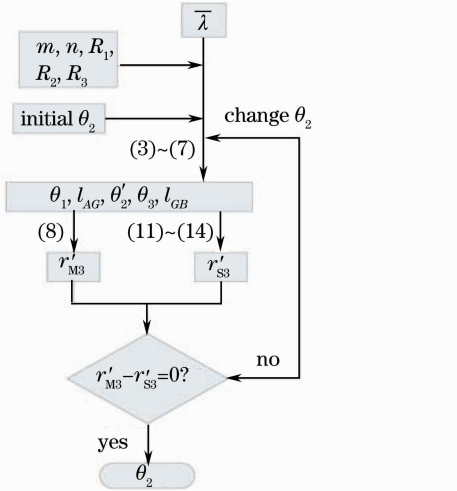


图 3 对已知光学元件进行优化设计流程

Fig. 3 Design procedure with the existing components

4 设计实例及实验结果

田间作物信息成像光谱仪是以观测农作物生长为目标的一台成像光谱仪,在该光谱仪初始设计时,采用子午和弧矢聚焦曲线相切的方法得到了一套设计参数:狭缝长度 11 mm,光栅线密度为 100 lp/mm, $R_1 = 221.324$ mm, $R_2 = 112.2$ mm, $R_3 = 216.376$ mm。经过调研,备选光学元件参数为 $R_1 = 220$ mm, $R_2 = 112.2$ mm, $R_3 = 216.85$ mm。然后采用图 3 的流程进行优化设计,表 1 和图 4 分别为优化得到的参数和聚

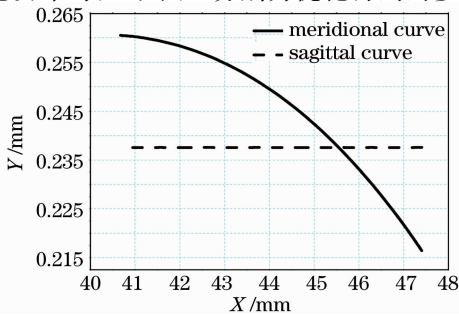


图 4 田间作物成像光谱仪聚焦曲线

Fig. 4 Focusing curves of the imaging spectrometer for plants in field

焦曲线,在 400 和 1000 nm 处两曲线间距仅为 $22 \mu\text{m}$ 。图 5 为采用该参数的光线追迹结果,在 F 数为 3.2 时 1000 nm 得到光斑半径的方均根值为 $2.3 \mu\text{m}$,而此时衍射极限为 $3.84 \mu\text{m}$,并且采用的面阵 CCD 像素尺寸为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,狭缝宽度(slit)为 $42 \mu\text{m}$,因而该系统的分辨率是由狭缝尺寸来限制的。图 6 为采用该参数设计的成像光谱仪拍摄低压汞灯的光谱,对于 546.1 nm 波长的谱线半高宽为 3 nm,已达到狭缝所对应的极限分辨。图 7 为在日光下拍摄米兰花叶的初步结果,光谱分辨与空间分辨都已满足设计要求。

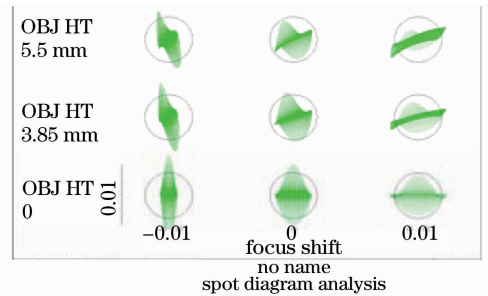


图 5 光线追迹结果

Fig. 5 Ray-tracing result

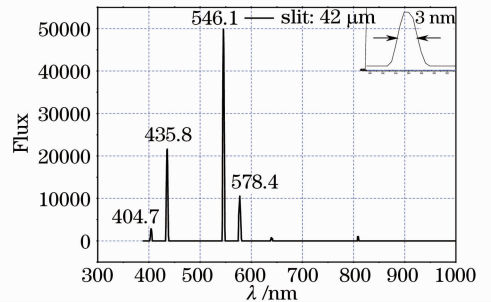


图 6 低压汞灯谱

Fig. 6 Spectrum of low pressure mercury lamp

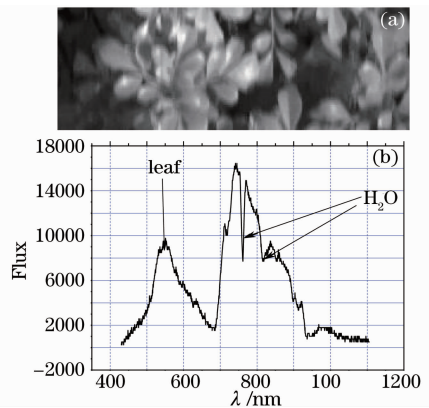


图 7 (a)重构图像;(b)叶子的反射光谱

Fig. 7 (a) Reconstructed image; (b) reflectance spectrum of leaf

表 1 田间作物成像光谱仪设计参数

Table 1 Design parameters of imaging spectrometer for plants in field

| R_1 | R_2 | R_3 | θ_1 | θ_2 | θ'_2 | θ_3 |
|-------|-------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| /mm | /mm | /mm | /($^\circ$) | /($^\circ$) | /($^\circ$) | /($^\circ$) |
| 220 | 112.2 | 216.85 | 13.644 | 27.55 | 23.112 | 11.718 |

5 结 论

通过对子午和弧矢聚焦曲线之间的位置关系进行详细的分析,提出了一套更加灵活简便的 Offner 成像光谱仪的设计方法。此方法能够以子午和弧矢聚焦曲线的任意位置关系为目标进行设计。采用该设计方法在已有元件参数的情况下,优化了一套参数,开发了一套成像光谱仪并初步得到了较好的结果,很好地验证了该方法的正确性、实用性和灵活性。

参 考 文 献

- 1 F. M. Reininger, Angioletta Coradini, Fabrizio Capaccioni *et al.*. VIRTIS: visible infrared thermal imaging spectrometer for the Rosetta mission[C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 66~77
- 2 N. Rowlands, R. A. Neville, I. P. Powell. Short-wave infrared (SWIR) imaging spectrometer for remote sensing[C]. *SPIE*, 1994, **2269**: 237~247
- 3 J. Fisher, J. Antoniadis, C. Rollins *et al.*. Hyperspectral imaging sensor for the coastal environment[C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 179~186
- 4 Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Cai Jianrong *et al.*. Estimation of tea quality level using hyperspectral imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 669~674
陈全胜, 赵杰文, 蔡健荣等. 利用高光谱图像技术评判茶叶的质量等级[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 669~674
- 5 Xue Long, Li Jing, Liu Muhua. Detecting pesticide residue on navel orange surface by using hyperspectral imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2277~2280
薛 龙, 黎 静, 刘木华. 基于高光谱图像技术的水果表面农药残留检测试验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2277~2280
- 6 Sun Xian, Wang Hongqi, Zhang Zheng *et al.*. Automatic method for urban roads detection and mapping based on remote sensing images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 86~92
孙 显, 王宏琦, 张 正等. 基于遥感图像的城市道路自动测绘方法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 86~92
- 7 Xun Lina, Fang Yonghua, Li Xin. A small target detection approach based on endmember extraction in hyperspectral image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1178~1182
寻丽娜, 方勇华, 李 新. 高光谱图像中基于端元提取的小目标检测算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1178~1182
- 8 Liu Xiaogang, Zhao Huijie, Li Na. Feature extraction based on multifractal spectrum for hyperspectral data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 844~847
刘小刚, 赵慧洁, 李 娜. 基于多重分形谱的高光谱数据特征提取[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 844~847
- 9 A. Offner. Unit power imaging catoptric anastigmat U. S. Patent 3,748,015 [P]. 1973
- 10 D. Kwo, G. Lawrence, M. Chrisp. Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system[C]. *SPIE*, 1987, **818**: 275~279
- 11 M. P. Chrisp. Convex diffraction grating imaging spectrometer U. S. Patent 5,880,834 [P]. 1999
- 12 D. Korsch. Reflective Optics[M]. Academic Press, 1991
- 13 F. M. Reininger. Imaging spectrometer/camera having convex grating U. S. Patent 6,100,974 [P]. 2000
- 14 P. Mouroulis. Low-distortion imaging spectrometer designs utilizing convex gratings[C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 594~601
- 15 P. Mouroulis, D. W. Wilson, P. D. Maker *et al.*. Convex grating types for concentric imaging spectrometers[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(31): 7200~7208
- 16 W. R. Johnson, D. W. Wilson, G. Bearman. All-reflective snapshot hyperspectral imager for ultraviolet and infrared applications[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(12): 1464~1466
- 17 Zheng Yuquan. 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
- 18 Huang Yuanshen, Ni Zhengji, Zhuang Songlin. 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
- 19 Huang Yuanshen, Chen Jiabi. Fourier analysis of Offner imaging spectrometer composed of a convex grating [J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(6): 40~43
黄元申, 陈家璧. 凸面光栅 Offner 结构成像光谱仪的傅里叶分析[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(6): 40~43
- 20 C. Simi, E. Winter, M. Williams *et al.*. Compact airborne spectral sensor (COMPASS)[C]. *SPIE*, 2001, **4381**: 129~136
- 21 Robert L. Lucke. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer [J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(7): 073004
- 22 X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce *et al.*. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9156~9168