

不同光栅常数下同心长波红外成像光谱仪对比

孙佳音^{1,2}, 李 淳¹, 刘 英¹, 李 灿¹, 王 建¹, 刘建卓¹, 孙 强¹

(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: 为对比分析不同光栅常数下 Offner 光栅和 Dyson 光栅光谱仪的性能差异, 推导了两种光谱仪结构的衍射角公式, 获得其衍射特点, 并在 F 数为 2.5, 工作波段为 8~12 μm , 光谱分辨率 15.6 nm, 光栅常数分别为 100 μm 、50 μm 下, 借助 ZEMAX 软件对这两种结构进行了优化设计。结果表明: 较大光栅常数下, 两者都能理想成像, Offner 光谱仪体积约为 Dyson 的 7 倍, 质量约为 Dyson 的 1/13; 较小光栅常数下, Dyson 光谱仪仍可理想成像, 而 Offner 必须加入二次非球面镜并进行离轴, 才能满足系统对像质及光谱分辨率的要求, 此时, Offner 光谱仪体积约为 Dyson 的 7 倍, 重量约为 Dyson 的 1/11。设计结果表明, 两种同心结构在加工难易度、体积、重量方面各有优劣, 在光谱仪选型工作中, 可根据具体情况进行取舍。

关键词: 光谱学; 长波红外; 成像光谱仪; 光栅常数; 同心结构

中图分类号: O435.1; TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0720002

Comparison of long-wave infrared imaging spectrometers with concentric under different grating constants

Sun Jiayin^{1,2}, Li Chun¹, Liu Ying¹, Li Can¹, Wang Jian¹, Liu Jianzhuo¹, Sun Qiang¹

(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)

Abstract: Performance differences between Offner convex grating imaging spectrometer and Dyson concave grating imaging spectrometer, both with concentric structure, was analyzed under different grating constants. The diffraction angle expressions of the two spectrometers were obtained, and their diffraction characteristics were acquired. Both of the spectrometers were designed and analyzed by ZEMAX, under F number of 2.5, spectral range of 8–12 μm , spectral resolution of 15.6 nm, and grating constants of 100 μm and 50 μm . The two structures could both meet the system requirements using spherical mirrors in the case of a higher grating constant. Offner's volume is 7 times larger than Dyson's, and Offner's weight is about Dyson's 1/13. When grating constant turned lower, Dyson could still meet the requirements just with spherical mirrors, while Offner must adopt aspherical mirrors and make an off-axis design for the requirements. The Offner's volume is 7 times larger than Dyson's, and Offner's weight is about Dyson's

收稿日期: 2015-11-24; 修订日期: 2015-12-27

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ14051702); 吉林省省科技厅项目(20140204030GX)

作者简介: 孙佳音(1988-), 女, 博士生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: superjiayin@163.com

导师简介: 孙强(1971-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学系统设计方面的研究。Email: sunq@ciomp.an.cn

1/11. The results show that Offner form and Dyson form have advantages and disadvantages in the aspect of operability of machining, volume, and weight. In the selection of spectrometer, the choice should be made depending on the specific application requirements.

Key words: spectroscopy; long-wave infrared; imaging spectrometer; grating constant; concentric structure

0 引言

成像光谱仪是在多光谱遥感成像技术基础上发展起来的新型空间大气光学遥感仪器,其能够以高光谱分辨率获取目标的超多谱段^[1]。工作于长波红外波段(8~12 μm)的成像光谱仪在物质探测识别方面具有明显的优势,且保密性好、可昼夜连续工作、受天气影响较小、抗干扰能力强。随着近年来红外探测器技术的飞速发展,长波红外成像光谱仪在化学气体流检测、地雷探测、化学云层绘图等领域得到了越来越广泛的应用^[2-4]。基于同心结构的光栅光谱仪结构简单紧凑,体积小、重量轻,数值孔径大,谱线弯曲和谱带弯曲小^[5-6],其中,Offner 与 Dyson 结构是两种典型的同心结构。2002 年 3 月欧空局以 Dyson 结构为原型研制了 MERIS (MEDIUM Resolution Imaging Spectrometer),它用于监测海洋和海岸带的水色,工作波段为 0.39~1.04 μm,采样频率为 1.25 nm,空间分辨率为 300 m^[7-8]。2005 年美国 NASA 火星计划发射了第一个可见/近红外成像光谱仪 CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars),其光学系统采用了 Offner 结构,工作波段为 0.36~3.92 μm,光谱分辨率可达 6.55 nm,主要任务是探测火星表面的尘埃^[9]。国内关于同心成像光谱仪的研究起步较晚,且多停留在实验室研究阶段。中科院长春光机所刘玉娟等人以凸面光栅为核心元件研制了 Offner 型便携式成像光谱仪,其工作波段为 0.4~0.8 μm,光谱分辨率为 2.1 nm^[10]。苏州大学现代光学技术研究所刘子寒等人设计出了 F 数为 1.2 的 Dyson 型成像光谱仪,在 7.5~10 μm 波段内实现了 50 nm 光谱分辨率^[4]。此前,作者曾对比分析了基于 Dyson 结构与 Offner 结构的长波红外成像光谱仪在不同 F 数下的性能特点,得出了两者各自的优势与应用局限^[11]。

光栅常数作为分光元件中比较重要的参数,既决定着分光系统的体积,又影响着光学系统的轴外

像差。文中在长波红外波段范围,推导了两种同心结构的衍射角表达式,得出相对于 Offner 结构, Dyson 结构的光谱仪可以在相同的光栅常数下具有较小衍射角的结论。在不同光栅常数下,设计了两种具有同心结构的光谱仪,根据设计结果,就体积大小、重量等方面综合对比讨论了两种同心结构光谱仪的性能差异,为以后长波红外成像光谱仪光谱分光系统的选型设计提供了参考依据。

1 长波红外成像光谱仪技术指标的确定

取系统 F 数为 2.5,并选用像元数为 320×256 的长波红外 HgCdTe 探测器作为探测元件,其像元大小为 $a=30 \mu\text{m}$ 。

光栅衍射方程:

$$d(\sin i \pm \sin \theta) = m\lambda \quad (1)$$

式中: d 为光栅常数; i 和 θ 分别为入射角和衍射角; m 为衍射级次; λ 为衍射波长。

光栅的角色散为:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\theta} \quad (2)$$

当会聚镜的焦距为 f' 时,光栅的线色散为:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{mf'}{d\cos\theta} \quad (3)$$

可见,在一定波长范围内,衍射角变化不大时可近似为线性色散。为了使光学系统分辨率与探测器相匹配,需满足:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{a}{\Delta\lambda} \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为系统的光谱分辨率。为保证全工作波段经光栅衍射后的色散宽度恰好为探测器光谱维大小,需满足:

$$\frac{a}{\Delta\lambda} = \frac{Na}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (5)$$

式中: N 为探测器的光谱维像元数; $\lambda_2 - \lambda_1$ 为工作波段。

由公式(1)、(2)可知,波长大的衍射角也大,因

此角色散率较大。大的角色散率会增大像方视场角,轴外像差较大,而大的光栅常数可以减小衍射角,进而降低轴外像差。在 $d\lambda/d\lambda$ 一定的情况下,由公式(3)可知,光栅常数较大的系统焦距较大,系统体积也往往较大。因此光栅常数既影响着系统的成像质量,又决定着系统的体积大小,系统体积的大小与成像质量的优劣是相互制约的。

通常 8~12 μm 波段常用的光栅刻线数(L/mm)有: 20、50、75、100、150,文中选取 $d_1=100\ \mu\text{m}$ 、 $d_2=50\ \mu\text{m}$ 两种不同的光栅常数。由公式(3)、(4)和(5)计算得到成像物镜焦距 $f_1'=192\ \text{mm}$ $f_2'=96\ \text{mm}$ 。

系统的光谱分辨率主要由光谱仪本身及探测器决定,而光谱仪的分辨率主要取决于光谱的展宽和像斑在展开方向的尺寸大小,当展宽一定时,影响分辨率的主要因素就是像斑在展开方向的尺寸大小,而像斑的大小则由像质决定。将 $N=256$ 、 $\lambda_2-\lambda_1=4\ \mu\text{m}$ 代入公式(5)可得探测器的分辨极限为 $\Delta\lambda=15.6\ \text{nm}$ 。光学系统分辨率同探测器相匹配时,理想成像情况下光谱展宽决定的分辨率同探测器分辨极限一致,因此系统的光谱分辨率为 $15.6\ \text{nm}$ 。此时的光谱展宽为 $30\ \mu\text{m}\times 256\ \mu\text{m}=7.68\ \text{mm}$,表 1 给出了光谱仪的设计指标。

表 1 光谱仪的设计指标

Tab.1 Indicators for spectrometer

Performance parameters	Values
Spectral range	8~12 μm
$F/\#$	2.5
$d_1(d_2)$	100 μm (50 μm)
Width of spectrums	7.68 mm
Spectral resolution	15.6 nm
Diffraction orders in Offner(Dyson)	-1(+1)
Slit size	9.6 mm \times 30 μm
$f_1'(f_2')$	192 mm(96 mm)

2 两种同心光栅光谱仪的结构及其衍射特点

2.1 两种同心光栅光谱仪结构

Offner 结构由一个凹面反射镜(次镜)和一个凸面反射镜(主镜)组成,两面镜子拥有公共的球心。凸面反射镜为系统光阑且位于凹面反射镜的焦平面附近,系统为双远心系统。将凸面反射镜换为凸面反射光栅,即构成 Offner 型凸面光栅光谱仪^[12-13]。反射镜

的材料为 Al 板($\rho_{\text{Al}}=2.7\ \text{g}/\text{cm}^3$)。

Dyson 结构由一个平凸厚透镜和一个大的凹面反射镜构成,凸面、凹面有共同的球心。凹面镜为系统光阑且位于平凸厚透镜的焦平面处,系统为双远心系统。将凹面反射镜换成凹面反射光栅,即构成 Dyson 型凹面光栅光谱仪^[14-15]。选用透过性良好的 ZnSe($\rho_{\text{ZnSe}}=5.27\ \text{g}/\text{cm}^3$)作为平凸厚透镜的材料。

2.2 两种同心结构衍射特点分析

2.2.1 Offner 光谱仪衍射特点分析

Offner 光谱仪中的光栅方程为:

$$d(\sin i_1 - \sin \theta) = -\lambda \quad (6)$$

如图 1 所示, $M1$ 为主镜, G 为凸面反射光栅, C 为它们的公共球心, A 为物点, h 为物高, R_1 、 R_2 分别为 $M1$ 、 G 的半径, u 为物方孔径角, α 、 i_1 分别为光线在 $M1$ 、 G 上的入射角, θ 为衍射角, l 为光线在 $M1$ 上的反射光线与光轴的交点和 C 点之间的距离, β 为光线在 $M1$ 上的反射光线与光轴的夹角。

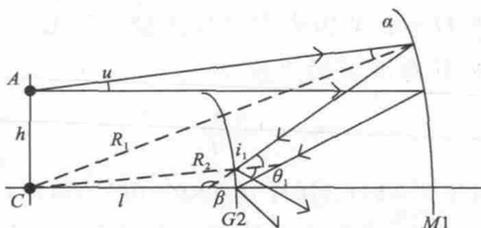


图 1 Offner 结构衍射示意图

Fig.1 Diffraction schematic of Offner

根据正弦定理:

$$\frac{\sin \alpha}{h} = \frac{\sin(90^\circ + u)}{R_1} \quad (7)$$

经整理得:

$$\sin \alpha = \frac{\cos u}{R_1} h \quad (8)$$

同样根据正弦定理:

$$\frac{\sin \beta}{R_1} = \frac{\sin \alpha}{l} \quad (9)$$

$$\frac{\sin i_1}{l} = \frac{\sin \beta}{R_2} \quad (10)$$

经整理得:

$$\sin i_1 = \frac{\sin \alpha}{R_2} R_1 \quad (11)$$

此外,为保持光线不被反射镜遮挡, h 需满足:

$$\tan u = \frac{h}{R_1} \quad (12)$$

将公式(8)、(12)式代入公式(11),得:

$$\sin i_1 = \frac{\sin u \cdot R_1}{R_2} \quad (13)$$

推得任意波长衍射角:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d} + \frac{\sin u \cdot R_1}{R_2}\right) \quad (14)$$

2.2.2 Dyson 光谱仪衍射特点分析

Dyson 光谱仪的衍射过程如图 2 所示, 其中 G 为光栅, θ_2 为衍射角。

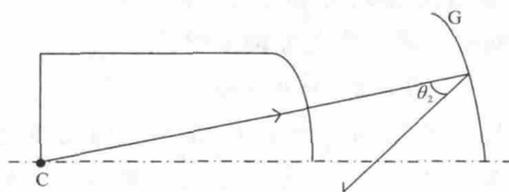


图 2 Dyson 结构衍射示意图

Fig.2 Diffraction schematic of Dyson spectrometer

Dyson 光谱仪中的光栅方程为:

$$d(\sin i_2 + \sin \theta_2) = \lambda \quad (15)$$

由于 Dyson 结构中物点位于公共球心, 入射角 $i_2=0$, 推得任意波长衍射角 θ_2 :

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right) \quad (16)$$

对比公式(14)、(16), 有 $\theta_2 < \theta_1$, 由公式(14)还可以看出, Offner 结构中角色散率与孔径角成正比, 因此这两种结构在对轴外像差的控制上, 尤其是在孔径角较大的情况下, Dyson 结构更具优势。

3 不同光栅常数下两种结构光谱仪的设计对比

3.1 光栅常数为 100 μm

根据两种结构的特点, 参照表 1 的数据, 用 ZEMAX 软件设计了初始结构。为保证谱面宽度和探测器光谱维宽度相匹配, 可适当调整焦距的大小。为避免 Offner 结构中的光线被镜面遮挡, 可对边缘光线进行追迹并加以控制。通过优化实现理想成像, 得出如图 3、4 所示的设计结果。

Offner 光谱仪结构如图 3 所示, 其大小为 387 mm \times 310 mm \times 160 mm, 若将反射镜近似视为高度为 5 mm 的圆柱体, 则可计算得到 $M1, M3$ 的总重量为 0.51 kg; 中心波长为 8 μm 处, 系统光谱分辨率最低(为 12 nm), 如图 4 所示。

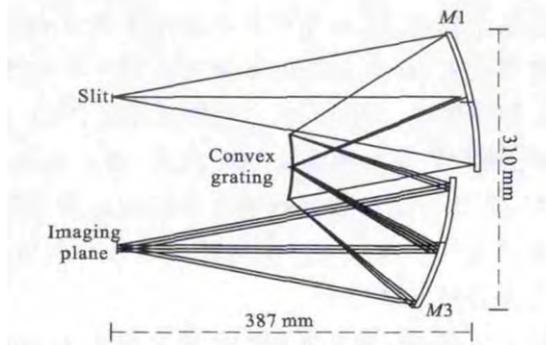


图 3 $d_1=100 \mu\text{m}$ 时, Offner 型凸面光栅光谱仪

Fig.3 $d_1=100 \mu\text{m}$, Offner spectrometer with convex grating

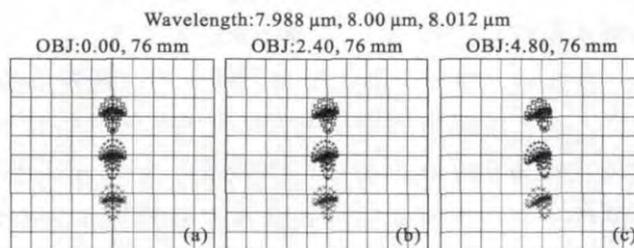


图 4 谱宽为 $\pm 12 \text{ nm}$ 时波长为 8 μm 的点列图

Fig.4 Spot diagram of system at 8 μm with line width of $\pm 12 \text{ nm}$

图 5 为 Dyson 光谱仪光路图, 其结构大小为 445 mm \times 81 mm \times 78 mm, ZnSe 厚透镜可近似视为高度为 255 mm 的圆柱体, 其质量约为 6.76 kg; 中心波长为 12 μm 处, 光谱分辨率最低, 为 5 nm, 如图 6 所示。

两种结构的光谱仪都能够满足成像光谱仪对像质和光谱分辨率的要求; Offner 结构需要较大的离轴量, 体积较大; 质量上, 两者的光栅材料相同, 大小相当, 可视为等重, 而 Offner 的反射镜则要比 Dyson

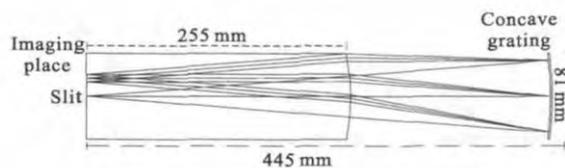


图 5 $d_1=100 \mu\text{m}$ 时 Dyson 型凹面光栅光谱仪

Fig.5 $d_1=100 \mu\text{m}$, Dyson spectrometer with concave grating

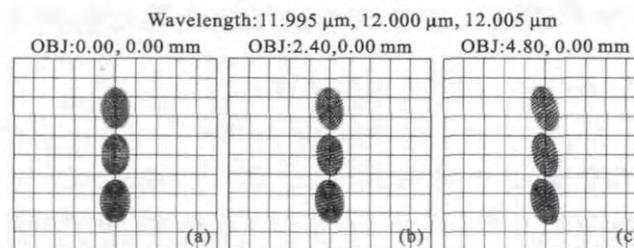


图 6 谱宽为 $\pm 5 \text{ nm}$ 时波长为 12 μm 处的点列图

Fig.6 Spot diagram of system at 12 μm with line width of $\pm 5 \text{ nm}$

的厚透镜轻一个数量级。

3.2 光栅常数为 50 μm

同样参照表 1 的数据，在光栅常数为 50 μm 时设计并优化了两种同心结构的光谱仪。

Offner 光谱仪存在较大的球差以及彗差，未能达到衍射极限。为减小像差，在系统中加入二次非球面镜并进行离轴及偏心设计。优化后得到 Offner 光谱仪结构，如图 7 所示，其大小为 219mm×180mm×88mm，两块反射镜 M1、M3 的重量约为 0.14 kg；中心波长 12 μm 处，光谱分辨率最低(为 8 nm)，如图 8 所示。

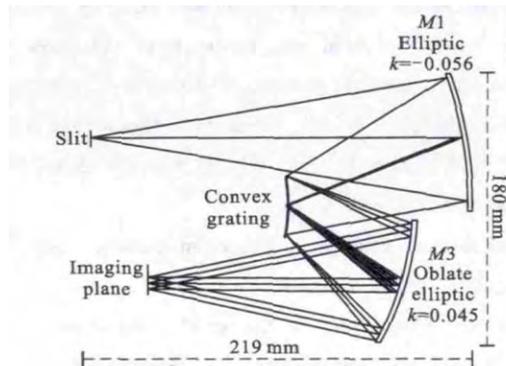


图 7 $d_2=50 \mu\text{m}$ 时, Offner 型凸面光栅光谱仪

Fig.7 $d_2=50 \mu\text{m}$, Offner spectrometer with convex grating

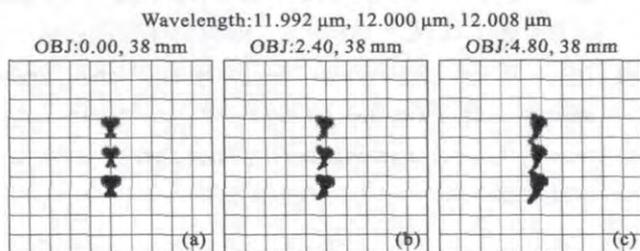


图 8 谱宽为 ±8 nm 时波长为 12 μm 处的点列图

Fig.8 Spot diagram of system at 12 μm with line width of ±8 nm

Dyson 光谱仪结构如图 9 所示，其结构大小为 224 mm×54 mm×43 mm，ZnSe 厚透镜的质量约为 1.47kg；中心波长 12 μm 处，光谱分辨率最低，为 14 nm，如图 10 所示。

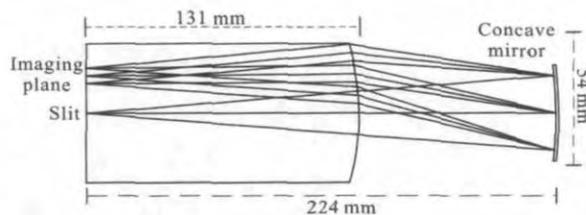


图 9 $d_2=50 \mu\text{m}$ 时 Dyson 型凹面光栅光谱仪

Fig.9 $d_2=50 \mu\text{m}$, Dyson spectrometer with concave grating

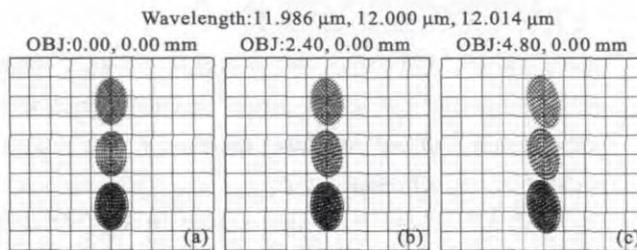


图 10 谱宽为 ±14 nm 时波长为 12 μm 处的点列图

Fig.10 Spot diagram of system at 12 μm with line width of ±14 nm

Offner 结构中过大的衍射角严重破坏了光线的对称性，产生了较大的轴外像差，加入非球面镜并进行离轴设计后，可满足设计要求；Dyson 结构中衍射角的增大也带来了一定的像散，但系统的对称性并没有受到太大的破坏，依然能够满足成像质量及光谱分辨率的要求；与 $d_1=100 \mu\text{m}$ 时的情况相同，Dyson 光谱仪的体积较小但重量较大。

4 结 论

文中设计并对比了不同光栅常数下两种同心结构光栅光谱仪的性能。通过对比可知，在较小的光栅常数下，两者的像质都受到了一定的影响，Dyson 结构中的衍射角较小，轴外像差较易控制，无需采用非球面就能够理想成像；在相同的光栅常数下，Offner 结构存在较大的离轴量，使得其体积较大，但由于 Dyson 结构中的 ZnSe 晶体较为厚重，所以在系统轻重方面，Offner 更具优势。通过以上设计、对比分析可知，Offner 结构与 Dyson 结构各具优势，Offner 结构重量轻，但在小体积下像质较差，需进行离轴设计和非球面化；Dyson 结构像质好，体积小，结构对称性好且较易实现。在长波红外成像光谱仪中，为实现一定的信噪比，需要对系统封装制冷，因此具有较小体积的 Dyson 光谱仪更具优势。Offner 光谱仪采用的是反射式，能量损失少，且没有色差的影响，在对系统体积要求不是很苛刻的系统中，如可见/近红外成像光谱仪，依然可以选择其作为分光部分。

参考文献：

[1] Zhang Jing, Wang Shurong, Huang Yu, et al. Status and development of limb imaging spectrometers [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 692-700. (in Chinese)
张晶, 王淑荣, 黄煜, 等. 临边成像光谱仪的发展现状与进

- 展[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 692-700.
- [2] Zhang Faqiang, Fan Xiang, Zhu Bin, et al. Athermal design of long-wave infrared optical system with hybrid refractive/diffractive[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1158-1163. (in Chinese)
张发强, 樊祥, 朱斌, 等. 折衍混合长波红外光学系统消热差设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1158-1163.
- [3] Luo Shoujun, Xia Yinhui, Yang Ningning, et al. Long-wavelength infrared continuous zoom scanning optical system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 107-113. (in Chinese)
骆守俊, 夏寅辉, 杨宁宁, 等. 扫描型长波红外连续变焦光学系统[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 107-113.
- [4] Liu Zihan, Ji Yiqun, Shi Rongbao, et al. Optical design of airborne infrared pushbroom imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2941-2946. (in Chinese)
刘子寒, 季轶群, 石荣宝, 等. 机载红外推扫成像光谱仪光学设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2941-2946.
- [5] Lobb D R. Theory of concentric design for grating spectrometers[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(13): 2648-2658.
- [6] Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang, et al. Design of long-wave infrared imaging spectrometer with eliminating spectral curvature[J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(2): 266-273. (in Chinese)
张晓龙, 刘英, 孙强, 等. 消谱线弯曲长波红外成像光谱仪设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 266-273.
- [7] Gillwa Baudin, Richard Bessudo, Jean-Loup Bezy. Medium-resolution imaging spectrometer[C]//SPIE, 1994, 2209: 115-125.
- [8] Delwart S, Bourg L. MERIS calibration: 10 years[C]//SPIE, 2013, 8866: 1-16.
- [9] Murchie S, Arvidson R, Beisser K, et al. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars reconnaissance orbiter (MRO) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(E05S03): 1-57.
- [10] Liu Yujuan, Cui Jicheng, Bayanheshig, et al. Design and application of imaging spectrometers with convex gratings[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(1): 52-57. (in Chinese)
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.
- [11] Sun Jiayin, Liu Ying, Li Chun, et al. Comparative study on the performance of long-wave infrared imaging spectrometer based on Offner form and Dyson form [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1030003-1-1030003-7. (in Chinese)
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): 1030003-1-1030003-7.
- [12] Offner A, New concepts in projection mask aligners [J]. *Opt Eng*, 1975, 14(2): 130-132.
- [13] Zhang Hao, Fang Wei, Ye Xin, et al. Daul-order overlapped Offner imaging spectrometer in middle-and long-wave infrared regions [J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23 (4): 965-974. (in Chinese)
张浩, 方伟, 叶新, 等. 中/长波红外双衍射级次共 Offner 成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 965-974.
- [14] Dyson J. Unit magnification optical system without Seidel aberrations[J]. *J Opt Soc Am*, 1959, 49(7): 713-716.
- [15] Mertz L. Concentric spectrographs[J]. *Appl Opt*, 1977, 16(12): 3122-3124.