

紧凑型消像散长狭缝光谱仪光学系统

朱嘉诚^{1,2*}, 沈为民^{1,2}

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
2. 苏州大学 光电科学与工程学院 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要:为提高高光谱遥感仪器的幅宽和减小其体积,重点研究适用于宽幅高光谱遥感的长狭缝、紧凑型 Wynne-Offner 光谱仪.通过追迹主光线,导出像散表达式,分析 Offner 装架和 Wynne-Offner 光装架的像散特性.指出 Wynne-Offner 装架的消像散圆域大于 Offner 装架的消像散圆环域,前者更适用于长狭缝.给出两个光谱仪实例,狭缝长度均为 70 mm,分别工作于 0.5~1.0 μm 和 1.0~2.5 μm 波长范围,成像质量接近于衍射极限,光谱畸变可忽略,具备狭缝长、结构紧凑、像质优的特点,适用于宽幅高光谱遥感应用.

关键词:高光谱遥感;Wynne-Offner 光谱仪;长狭缝;消像散

中图分类号:O439 **文献标识码:**A

Compact anastigmatic long-slit spectrometer

ZHU Jia-Cheng^{1,2*}, SHEN Wei-Min^{1,2}

(1. Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Jiangsu, Suzhou 215006, China)

Abstract: In order to increase the swath width and reduce the volume of hyperspectral remote sensing instruments, the compact, long-slit Wynne-Offner spectrometers suitable for wide swath width were detailedly studied. By tracing the chief ray, expressions of the astigmatism were deduced, and the astigmatism of the Offner configuration and the Wynne-Offner configuration were analyzed. It was pointed out that the anastigmatic circle domain of the Wynne-Offner configuration is larger than that of the Offner configuration, and the former was more suitable for long slit. Two examples of spectrometers were given. Length of their slits are both 70 mm, and they worked in the wavelength range of 0.5 ~ 1.0 μm and 1.0 ~ 2.5 μm respectively. The imaging quality was close to the diffraction limit, and the spectral distortion was negligible. Such Wynne-Offner spectrometers have the advantages of long slit, compact structure and high imaging quality, and it is really suitable for the remote sensing applications with wide swath width.

Key words: hyperspectral remote sensing, Wynne-Offner spectrometer, long slit, anastigmatic

PACS: 42.15.Eq, 42.15.Fr, 95.75.Fg

引言

高光谱遥感技术广泛应用于防灾减灾、环境监测、矿物勘探、军事侦查等领域,随着各应用领域对宽地面覆盖的需求日益增长,要求成像光谱仪分光

系统往长狭缝的方向发展.本文重点研究 Wynne-Offner 光谱仪,它具备狭缝长、结构紧凑、成像质量优、无光谱畸变等特点.

Wynne-Offner 光谱仪由 Offner 光谱仪发展而来.1973 年,Abe Offner^[1]首次提出用两块同心球面

收稿日期:2018-12-15,修回日期:2019-05-05

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0500501-02)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0500501-02)

作者简介 (Biography): 朱嘉诚(1993-),男,江苏张家港人,博士研究生,主要从事成像光谱技术方面的研究. E-mail:20174008029@stu.suda.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail:20174008029@stu.suda.edu.cn

Received date: 2018-12-15, **revised date:** 2019-05-05

反射镜,构成 1:1 倍率的中继扫描光刻系统,该中继系统可在圆环域具有最佳成像质量^[1,3]. L. Mertz^[4]和 Kwo^[5]等将 Offner 中继系统中的凸面反射镜替换成凸面衍射光栅,构成 Offner 分光装架,它继承了 Offner 中继系统的性能,在最佳成像圆环域初级像差皆被消除,仅剩余五级像散. 1999 年,Chrisp^[3]提出将经典 Offner 分光装架的凹球面反射镜拆分成两块非共面反射镜,并轻微离轴和倾斜,打破原有的同心性,增加设计自由度,进一步提升像质和增大谱面宽度. 2006 年, X. Prieto-Blanco^[6]等给出了 Offner 光谱仪的分析设计方法,能够快速设计出高成像质量的 Offner 光谱仪,指出其主要剩余像差为像散. 由于 Offner 光谱仪可在圆环域获得高成像质量,因此狭缝在该区域时光谱成像性能优越,而超出此区域时有较大像差. 1989 年, Wynne^[2]为扩大 Offner 中继系统最佳成像区域范围,在凸面镜前加入同心弯月透镜校正主光线球差,增加了最佳成像区域范围. Lobb^[7]利用这一特性,在 Offner 分光装架凸面衍射光栅前加入弯月透镜,设计了结构紧凑的大谱面光谱仪^[8]. 2014 年, X. Prieto-Blanco^[9]等通过追迹主光线,证明 Wynne-Offner 光谱仪可在两个不同的离轴位置满足远心条件,指出它具有狭缝长、结构紧凑、成像质量优、光谱畸变小等特点. 最近,基于自由曲面的 Offner 光谱仪^[10-15]逐渐成为研究热点,它结构紧凑、狭缝长、像差校正能力强,但自由曲面光栅的加工和检测十分困难,短期内难以得到广泛的工程应用. Wynne-Offner 光谱仪仅含球面光学元件,研制难度小、成本低、周期短,已应用于高光谱遥感领域^[16-18]. 目前关于 Wynne-Offner 光谱仪的报道多为光学设计软件的优化结果,未见基于像差理论的分析设计报道. 本文第 2 部分利用主光线追迹方法,导出 Offner 分光装架和 Wynne-Offner 分光装架的像散表达式,指出后者更适用于长狭缝,并给出它的设计流程;第 3 部分给出两个长狭缝 Wynne-Offner 光谱仪实例,验证了 Wynne-Offner 光谱仪在校正像差和减小体积方面明显优于经典 Offner 光谱仪;第 4 部分给出总结与结论.

1 理论分析

为说明 Wynne-Offner 分光装架的消像散性能,通过主光线追迹方法,利用罗兰圆条件和杨氏公式求得子午和弧矢像点位置,给出 Offner 分光装架和 Wynne-Offner 分光装架的像散表达式,讨论两者像散特性并指出 Wynne-Offner 分光装架的性能优势.

最后根据 Wynne-Offner 分光装架消像散时系统参数的内在联系,给出其设计流程.

1.1 Offner 分光装架像散分析

Offner 分光装架狭缝上任一点成像光路如图 1 所示, C 为主镜 M1、凸面衍射光栅 G 和三镜 M3 的公共球心, O 为狭缝上任一点, O_0 为狭缝中心, 以 C 为原点建立图示直角坐标系, 狭缝和光栅刻线均平行于 x 轴. 图 1(a) 为入射光路图, y_0, Cz 为入射面, 从狭缝上任一点 O 入射的主光线在 M1 的入射角为 θ_1 , 在 G 的入射角为 θ_2 , OC 和 y_0 轴夹角为物极角 φ , M1 的子午和弧矢像点分别为 I_{M1}, I_{S1} , 弧矢像极角为 φ'_{S1} ; 图 1(b) 为出射光路图, y_r, Cz 为出射面, 主光线在 G 的衍射角为 θ_2' , 在 M3 的入射角为 θ_3 , M3 的弧矢物点为 I_{S2} , 弧矢物极角为 φ'_{S2} , 子午和弧矢像点分别为 I_M, I_S , 像极角分别为 φ'_M, φ'_S . 由杨氏弧矢成像式^[6]可推得

$$\varphi'_{S1} = \varphi \quad (1)$$

$$\varphi'_{S2} = \varphi'_S$$

在图 1(a) 和 (b) 中, 设 M1、G、M3 的曲率半径分别为 R_1, R_2, R_3 , 子午成像满足罗兰圆条件时

$$OC = R_1 \sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

$$CI_M = R_2 \sin \theta_2' = R_3 \sin \theta_3 \quad (3)$$

$$\varphi = \theta_2 - 2\theta_1 \quad (4)$$

$$\varphi'_M = 2\theta_3 - \theta'_2 \quad (5)$$

图 1(c) 为分光装架轴向视图, γ 为主光线入射光栅的方位角, γ' 为衍射方位角. O 点发出的主光线在 G 处满足空间光栅方程

$$\sin \theta_2' \cos \gamma' - \sin \theta_2 \cos \gamma = m g \lambda \quad (6)$$

$$\sin \theta_2' \sin \gamma' - \sin \theta_2 \sin \gamma = 0$$

光栅衍射光路可投影为主截面内的共面衍射和垂直于主截面的反射, 如图 1(d) 和图 1(e). 在图 1(d) 中, 入射角为 α , 衍射角为 α' , 子午物点为 $I_{M1\perp}$, 子午像点为 $I_{M2\perp}$, 弧矢物点为 $I_{S1\perp}$, 弧矢像点为 $I_{S2\perp}$, 弧矢物极角为 $\varphi'_{S1\perp}$, 弧矢像极角为 $\varphi'_{S2\perp}$. 在图 1(e) 中, 入射角为 β , 反射角为 β' , 子午物点为 $I_{M1\parallel}$, 子午像点为 $I_{M2\parallel}$, 弧矢物点为 $I_{S1\parallel}$, 弧矢像点为 $I_{S2\parallel}$, 弧矢物极角为 $\varphi'_{S1\parallel}$, 弧矢像极角为 $\varphi'_{S2\parallel}$, $x Cz$ 面内角度满足如下关系

$$\beta = \beta' \quad (7)$$

$$\tan \varphi'_{S1\parallel} = \tan \varphi'_{S1} \sin \gamma \quad (8)$$

$$\tan \varphi'_{S2\parallel} = \tan \varphi'_{S2} \sin \gamma'$$

$$\sin \beta \tan \varphi'_{S1\parallel} = \sin \beta' \tan \varphi'_{S2\parallel} \quad (9)$$

由式(1)和式(7-9)可推得 φ'_S 与 φ 满足关系如下

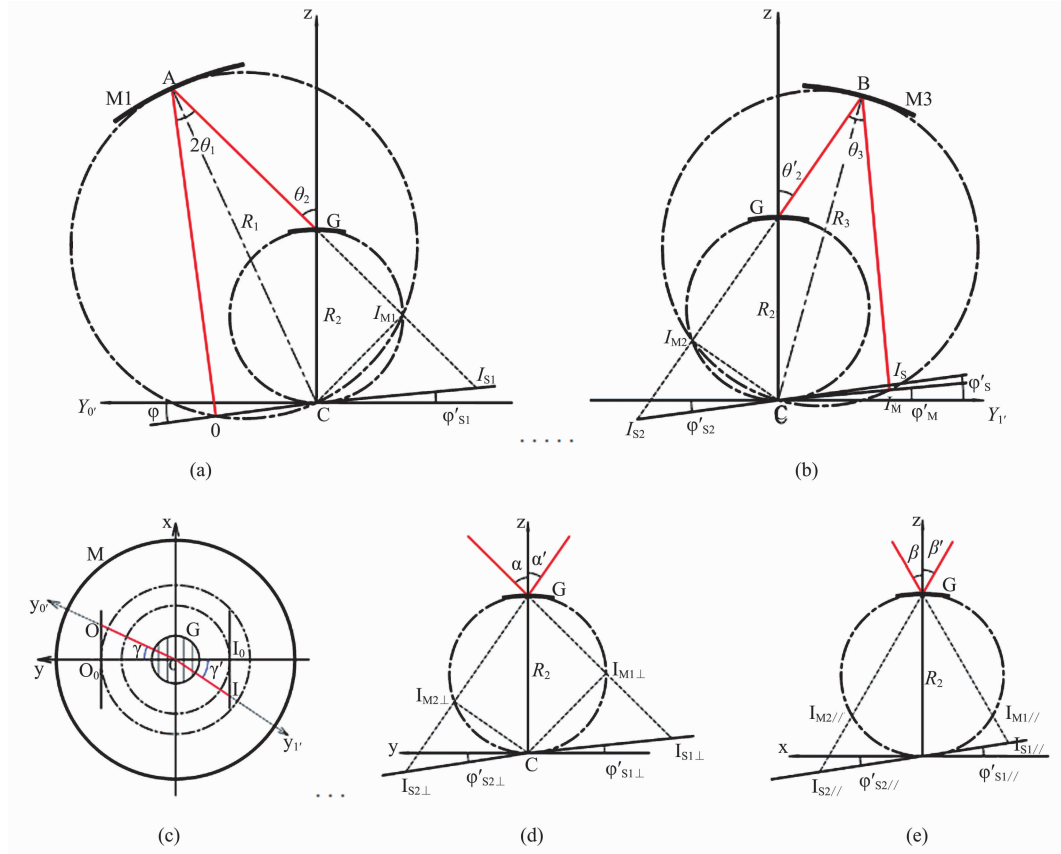


图 1 Offner 分光装架狭缝上任一点成像光路图 (a)入射光路, (b)出射光路, (c)系统轴向视图, (d)光栅主截面内投影, (e)垂直于光栅主截面的投影
 Fig. 1 Light path of Offner configuration from any point on the slit (a)path of incident light, (b) path of e-mergent light, (c) view along the Z-axis, (d) projection in the principal section of grating, (e) projection perpendicular to the principal section of grating

$$\tan\varphi'_s = \tan\varphi \cdot \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'} \quad (10)$$

Offner 分光装架狭缝上任一点像散为

$$astig_{offner} = CI_M \tan(\varphi'_s - \varphi'_M) \quad (11)$$

满足 $\varphi'_s = \varphi'_M$ 即可消像散, 一个特殊解为 $\varphi'_s = \varphi'_M = \varphi = 0$, 此时物方、像方主光线平行于光轴, 物、像方远心. 设任一物点坐标为 $O(x, y)$, $k = \sqrt{x^2 + y^2}/R_2, k_1 = R_1/R_2$. 以 k, k_1 为变量, 由式(2-6)和式(10), 可将像散表达式(11)中的三项参量具体表示为

$$CI_M = kR_2 \frac{\sin\gamma}{\sin\gamma'} \quad (12)$$

$$\varphi'_s = \arctan\left[\frac{\sin\gamma'}{\sin\gamma} \cdot \tan\left(\arcsin k - 2\arcsin \frac{k}{k_1}\right)\right] \quad (13)$$

$$\varphi'_M = 2\arcsin\left(\frac{k}{k_1} \cdot \frac{\sin\gamma'}{\sin\gamma}\right) - \arcsin\left(k \cdot \frac{\sin\gamma'}{\sin\gamma}\right) \quad (14)$$

设 Offner 分光装架 $R_1 = R_3, g = 200 \text{ lp/mm}, m = -1, \lambda = 600 \text{ nm}$, 优选 k_1 和狭缝离轴量 y , 当 $k_1 = R_1/R_2 = 1.91, y/R_2 = 0.605$ 时, 狭缝中心消像散, 但像散随狭缝长度增大而迅速增大, 如图 2 所示.

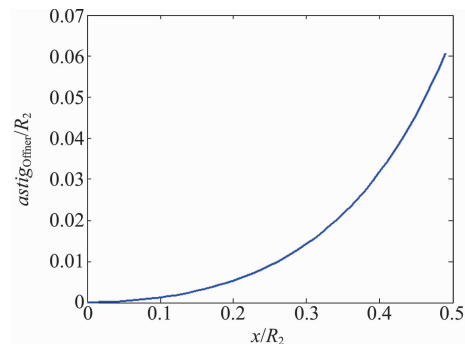


图 2 Offner 分光装架像散随狭缝半长度变化曲线
 Fig. 2 Astigmatism of the Offner spectrometer varied with the slit length

1.2 Wynne-Offner 分光装架像散分析

Wynne-Offner 分光装架任一物点成像光路如图

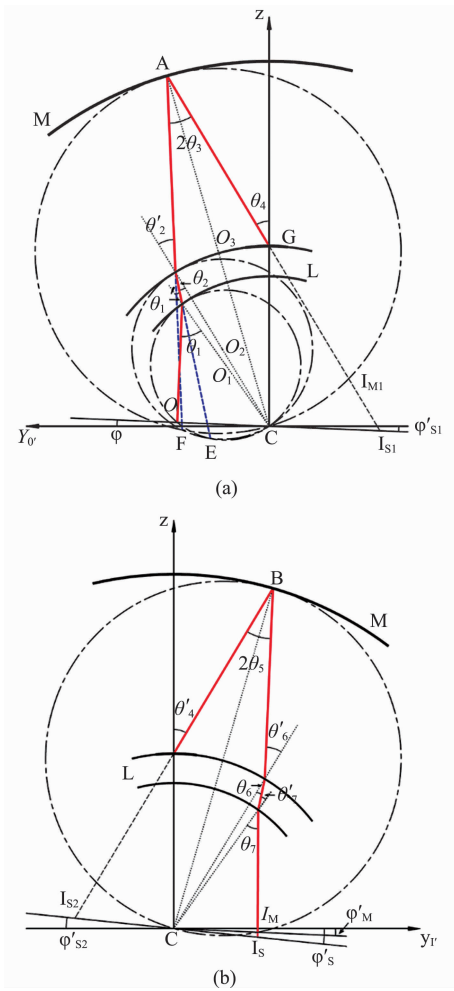


图3 Wynne-Offner 分光装架任意物点成像光路图(a)入射光路,(b)出射光路

Fig. 3 Light path of Wynne-Offner configuration from any point on the slit (a) path of incident light, (b) path of emergent light

3 所示,分光装架凹面反射镜 M、凸面衍射光栅 G 和弯月透镜 L 的前后表面共球心,球心为 C. 设 G 与 L 凸面共面,曲率半径为 R_2 ,L 凹面曲率半径为 R_1 ,M 曲率半径为 R_3 . 图 3(a) 为入射光路图,狭缝上任一点 $O(x, y)$ 发出的主光线在 L 凹面的入射角为 θ_1 、折射角为 θ_1' ,在 L 凸面的入射角为 θ_2 、折射角为 θ_2' ,在 M 的入射角为 θ_3 ,在 G 的入射角为 θ_4 . O_1 、 O_2 、 O_3 分别为 L 凹面、L 凸面和 M 对应的罗兰圆,点 E 和 F 分别为 L 凹面和 L 凸面对 O 点成的子午虚像点,E 为圆 O_1 和 O_2 的交点,F 为圆 O_2 和 O_3 的交点. 入射光路中子午和弧矢像点分别为 I_{M1} 和 I_{S1} ,物极角和弧矢像极角分别为 φ 和 φ'_{S1} ,由几何关系得

$$\varphi = 2\theta_3 + \theta_2 + \theta_1 - \theta_4 - \theta_2' - \theta_1' \quad (15)$$

由罗兰圆条件和斯涅耳定律可推得

$$\begin{aligned} OC &= R_1 \sin \theta_1 = R_1 n \sin \theta_1' = R_2 n \sin \theta_2 \\ &= R_2 \sin \theta_2' = R_3 \sin \theta_3 = R_2 \sin \theta_4 \quad (16) \end{aligned}$$

其中 n 为弯月透镜折射率. 图 3(b) 为出射光路图,光栅处衍射角为 θ_4' ,衍射后主光线在 M 的入射角为 θ_5 ,在 L 凸面的入射角为 θ_6' 、折射角为 θ_6 ,在 L 凹面的入射角为 θ_7' 、折射角为 θ_7 . 出射光路中子午和弧矢像点分别为 I_{M} 和 I_{S} ,子午像极角和弧矢像极角分别为 φ'_M 和 φ'_S , φ'_M 、 φ'_S 和 CI_M 满足如下等式

$$\varphi'_M = \theta_4' + \theta_6' + \theta_7' - 2\theta_5 - \theta_6 - \theta_7 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} CI_M &= R_1 \sin \theta_7 = R_1 n \sin \theta_7' = R_2 n \sin \theta_6 \\ &= R_2 \sin \theta_6' = R_3 \sin \theta_5 = R_2 \sin \theta_4' \quad (18) \end{aligned}$$

$$\tan \varphi'_S = \tan \varphi \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \quad (19)$$

其中 γ 和 γ' 满足空间光栅方程

$$\sin \theta_4' \cos \gamma' - \sin \theta_4 \cos \gamma = m g \lambda \quad (20)$$

$$\sin \theta_4' \sin \gamma' - \sin \theta_4 \sin \gamma = 0$$

Wynne-Offner 分光装架像散可表示为

$$\text{astig}_{\text{Wynne-Offner}} = CI_M \tan(\varphi'_S - \varphi'_M) \quad (21)$$

设任一物点坐标为 $O(x, y)$, $k' = \sqrt{x^2 + y^2}/R_2$, $k_1' = R_3/R_2$, $k_2' = R_1/R_2$. 以 k' , k_1' , k_2' 为变量,由式 (15-20),可将像散表达式 (21) 中的三项参量具体表示为

$$CI_M = k' R_2 \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \varphi'_S &= \arctan \left\{ \frac{\sin \gamma'}{\sin \gamma} \tan \left[2 \arcsin \left(\frac{k'}{k_1'} \right) + \arcsin \left(\frac{k'}{n} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \arcsin \left(\frac{k'}{k_2'} \right) - 2 \arcsin k - \arcsin \left(\frac{k'}{n k_2'} \right) \right] \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi'_M &= 2 \arcsin \left(k' \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \right) + \arcsin \left(\frac{k'}{n k_2'} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \right) - \\ &\quad 2 \arcsin \left(\frac{k'}{k_1'} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \right) - \arcsin \left(\frac{k'}{n} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \right) - \\ &\quad \arcsin \left(\frac{k'}{k_2'} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \right) \quad (24) \end{aligned}$$

设 $\lambda = 600 \text{ nm}$, $m = -1$, $g = 200 \text{ lp/mm}$, 优选 k_1' 、 k_2' , 当 $k_1' = 2.15$, $k_2' = 0.814$ 时, Wynne-Offner 分光装架物面对应的像散分布如图 4(a), 物点在圆域内消像散,适用于长狭缝,消像散阈值为 0.002.

在 2.1 节中讨论的 Offner 分光装架物面对应像散分布如图 4(b), 物点仅在光轴附近和离轴圆环域消像散,消像散的狭缝长度短. 图 5 为两种分光装架像散随狭缝长度的变化曲线,横坐标为归一化狭缝半长度,纵坐标为归一化像散,Offner 分光装架狭缝

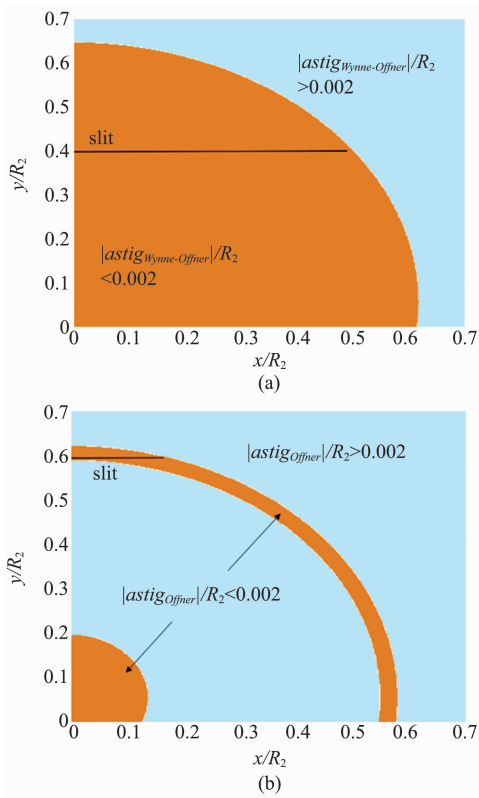


图4 分光装架物面消像散范围 (a) Wynne-Offner 分光装架, (b) Offner 分光装架
Fig. 4 Anastigmatic area of the spectrometer (a) Wynne-Offner type, (b) Offner type

离轴量为 $0.6R_2$, Wynne-Offner 分光装架狭缝离轴量为 $0.4R_2$. 由图可知, Wynne-Offner 分光装架在长狭缝范围内像散趋于零, 消像散的狭缝长度远大于 Offner 分光装架.

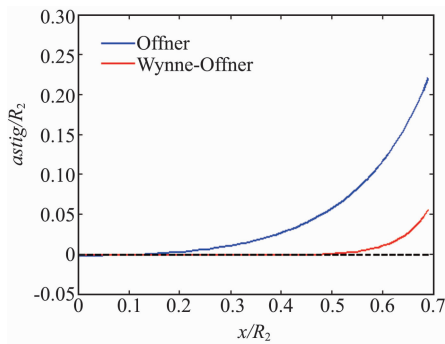


图5 两种分光装架狭缝长度方向像散
Fig. 5 Astigmatism of two spectrometers along the slit

1.3 Wynne-Offner 光谱仪设计流程

由式(21-24), 消像散时 Wynne-Offner 光谱仪狭缝半长度 x 和结构因子 k_1', k_2' 的关系如图 6 所示. 不同曲线表示不同 k_2' 值, 曲线与横轴平行部分越

长, 对应的消像散狭缝长度越长.

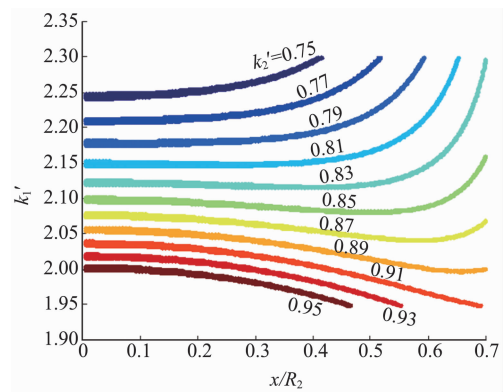


图6 Wynne-Offner 光谱仪消像散时 x 与 k_1', k_2' 关系 (狭缝离轴量为 $y = 0.4R_2$)

Fig. 6 Relationships between x, k_1' and k_2' when the Wynne-Offner spectrometer is anastigmatic (off-axis magnitude of slit is $y = 0.4R_2$)

输入狭缝长度指标, 可由图 6 初步确定 Wynne-Offner 光谱仪结构因子 k_1' 和 k_2' . 文献[6]给出了 Offner 光谱仪光栅半径与系统指标之间的关系, 同样适用于 Wynne-Offner 光谱仪:

$$R_2 = \frac{h_{spec}}{mg\Delta\lambda} \quad (25)$$

其中 h_{spec} 为光谱仪谱面宽度, $\Delta\lambda$ 为谱段宽度. 图 7 给出了 Wynne-Offner 光谱仪光学系统设计流程图, 可由输入的指标 $m, h_{spec}, \Delta\lambda, g$ 和狭缝长度来确定系统结构参数, 即狭缝离轴量 y , 弯月透镜凹面半径 R_1 , 凸面光栅半径 R_2 和凹球面反射镜半径 R_3 .

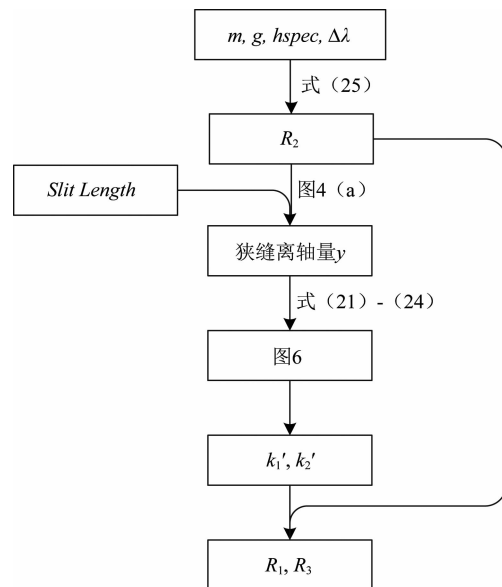


图7 Wynne-Offner 光谱仪光学系统设计流程图
Fig. 7 Steps for designing the Wynne-Offner spectrometer

2 设计实例

为验证 Wynne-Offner 光谱仪在长狭缝时的消像散性能,优化设计了两个光谱仪光学系统,分别工作于 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ (VNIR) 和 $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ (SWIR) 波长范围,利用图 7 流程求得初始结构,借助 Zemax 软件优化光学系统. 图 8 为设计的两台光谱仪光学系统光路图和轴向视图, S 为狭缝, IMAG 为谱面, 表 1 给出了这两台光谱仪光学系统的主要指标和性能参数.

表 1 VNIR 和 SWIR 光谱仪指标及性能参数
Table 1 Specifications and parameters of the VNIR and SWIR spectrometers

指标及性能	VNIR	SWIR
光谱范围/ μm	0.5 - 1.0	1.0 - 2.5
狭缝长度/mm	70	35 × 2
狭缝间隔/mm	—	7
谱面宽度/mm	9	6 × 2
F 数	2.7	2.7
光栅槽密度/ $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$	170	37.7
光栅衍射级次	-1	-1
R_1/mm	82.75	87.90
R_2/mm	98.62	106.11
R_3/mm	207.64	225.05
球心最大偏离/mm	0.06	0.14
狭缝离轴量/mm	52.7	46.6, 53.6
尺寸/mm	$\Phi 111 \times 207$	$\Phi 114 \times 225$
RMS 点列图直径/ μm	< 6	< 16
Smile/ μm	< 0.053	< 0.12
Keystone/ μm	< 0.053	< 0.10

图 8(a-b) 分别为 VNIR 光谱仪的光路图和轴向视图, 该光谱仪为平面对称系统, 狭缝长度为 70 mm, 相对孔径大, 系统无遮拦. 根据表 1 中数据, 狭缝归一化离轴量为 0.534, 结构因子 $k_1' = 2.105$, $k_2' = 0.839$. 该分光装架具有接近衍射极限的成像质量, 光谱范围内 RMS 点列图直径小于 $6 \mu\text{m}$, 并且具有可忽略的光谱畸变, Smile 和 Keystone 均小于 $0.053 \mu\text{m}$. 图 8(c-d) 分别为 SWIR 光谱仪的光路图和轴向视图, 该光谱仪双狭缝 S1、S2 总长 70 mm, 垂直狭缝方向间隔 7 mm. 根据表 1 中数据, SWIR 光谱仪结构因子 $k_1' = 2.121$, $k_2' = 0.828$, 狭缝 S1 和 S2 的归一化离轴量分别为 0.439 和 0.505, 该光谱仪 RMS 点列图直径小于 $16 \mu\text{m}$, 成像质量好, Smile 和 Keystone 均不足 $0.12 \mu\text{m}$, 光谱畸变小. 两台光谱仪结构紧凑, 各光学表面同心度高, 借助点源显微镜^[19]易将弯月透镜和凹球面反射镜的相对位置固定.

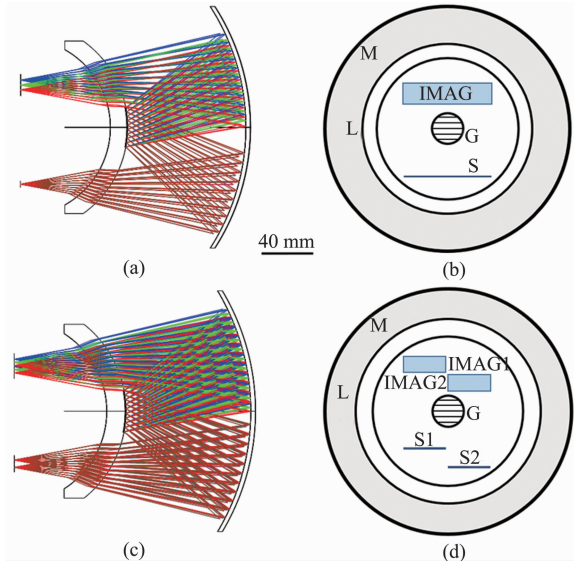


图 8 VNIR 和 SWIR 光谱仪 (a) VNIR 光谱仪光路图, (b) VNIR 光谱仪轴向视图, (c) SWIR 光谱仪光路图, (d) SWIR 光谱仪轴向视图

Fig. 8 VNIR and SWIR spectrometers (a) VNIR spectrometer, (b) axial view of the VNIR spectrometer, (c) SWIR spectrometer, (d) axial view of the SWIR spectrometer

为直观表现 Wynne-Offner 光谱仪的像差校正能力, 优化设计了同指标的 VNIR 波段 Offner 光谱仪, 并给出光谱全视场图 SFFD (Spectral Full-Field Display)^[20], 用于展现整个谱面内的像差分布情况, 如图 9. 保持体积相同时, Offner 光谱仪剩余波像差和像散 SFFD 分别由图 9(a-b) 给出; Wynne-Offner 光谱仪剩余波像差和像散 SFFD 分别由图 9(c-d) 给出. 由图可见, Offner 光谱仪剩余波像差和像散随狭缝增长而迅速增大, 在谱面内极不均匀, 剩余波像差均方值最大为 1.56λ , 剩余像散最大为 $131 \mu\text{m}$. Wynne-Offner 光谱仪剩余波像差和像散在谱面内小且均匀, 剩余波像差均方值最大为 0.11λ , 仅为 Offner 光谱仪的 7%, 剩余像散最大为 $13 \mu\text{m}$, 仅为 Offner 光谱仪的 10%. 同时还设计了像质接近衍射极限的 Offner 光谱仪, 其体积约为 Wynne-Offner 光谱仪的 3.3 倍, 因此采用 Wynne-Offner 光谱仪可在不降低像质的情况下大大缩小体积, 这在航天遥感应用中是极为重要的.

3 结论

本文通过主光线追迹法, 导出了 Offner 装架和 Wynne-Offner 装架的像散表达式, 讨论了两者的像散特性, 指出 Wynne-Offner 装架的消像散圆域大于 Offner 装架的消像散圆环域, 前者更适用于长狭缝.

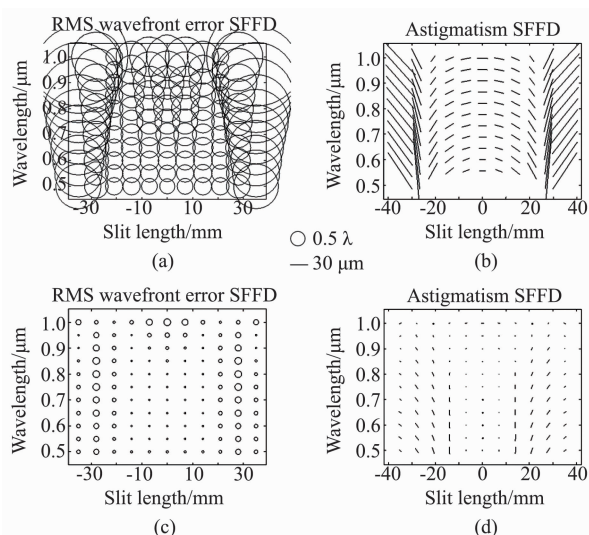


图9 光谱仪 SFFD (a) Offner 光谱仪剩余波像差 SFFD, (b) Offner 光谱仪剩余像散 SFFD, (c) Wynne-Offner 光谱仪剩余波像差 SFFD, (d) Wynne-Offner 光谱仪剩余像散 SFFD
Fig.9 SFFD (Spectral Full-Field Display) of spectrometers (a) RMS wavefront error of Offner spectrometer, (b) Astigmatism of Offner spectrometer, (c) RMS wavefront error of Wynne-Offner spectrometer, (d) Astigmatism of Wynne-Offner spectrometer

根据消像散条件,给出了 Wynne-Offner 光谱仪的设计流程.通过优化设计与比较,验证了 Wynne-Offner 装架在校正像差和减小体积方面明显优于经典 Offner 装架.这种 Wynne-Offner 光谱仪具备狭缝长、相对孔径大、无光谱畸变、结构紧凑、像质优、易装调的特点,十分适用于宽幅高光谱遥感应用.

References

- [1] Offner A. Unit power imaging catoptric anastigmat; US, 3748015[P]. 1973.
- [2] Wynne C G. Optical imaging systems; US, 4796984[P]. 1989.
- [3] Chrisp M P. Convex diffraction grating imaging spectrometer; US, 5880834[P]. 1999.
- [4] Mertz L. Concentric spectrographs [J]. *Applied Optics*, 1977, **16**(12):3122.
- [5] 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.
- [6] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, *et al.* Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(20):9156 - 68.
- [7] Lobb D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(13):2648.
- [8] Dan R L. Design of a spectrometer system for measurements on earth atmosphere from geostationary orbit [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5249**:191 - 202.
- [9] Prieto-Blanco X, Fuente R D L. Compact Offner-Wynne imaging spectrometers [J]. *Optics Communications*, 2014, **328**(10):143 - 150.
- [10] Reimers J, Schiesser E M, Thompson K P, *et al.* Comparison of freeform imaging spectrometer design forms using spectral full-field displays [C]// *OSA Technical Digest: Freeform Optics*. 2015:FM3B.3.
- [11] Wei L, Feng L, Zhou J, *et al.* Optical design of Offner-Chrisp imaging spectrometer with freeform surfaces [C]// *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2016:100211P.
- [12] Risse S, Krutz D. Design of an imaging spectrometer for earth observation using freeform mirrors [C]// *International Conference on Space Optics*, 2016:161.
- [13] Marchi A Z, Borguet B, Marchi A Z, *et al.* Freeform grating spectrometers for hyperspectral space applications: status of ESA programs [C]// *OSA Technical Digest: Freeform Optics*. 2017:JTh2B.5.
- [14] Reimers J, Bauer A, Thompson K P, *et al.* Freeform spectrometer enabling increased compactness [J]. *Light Science & Applications*, 2017, **6**(7):e17026.
- [15] Cheng D, Yang T, Wang Y. Freeform imaging spectrometer design using a point-by-point design method [J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(16):4718.
- [16] 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.
- [17] Zhang L F, Xu C R, Gao jun, *et al.* Recent advances in Chinese Spaceborne Hyperspectral Missions [C]// *IEEE-IGARSS ISIS TC Presentations-International Spaceborne Imaging Spectroscopy Missions: Updates and News II*, 2015.
- [18] Coppo P, Taiti A, Pettinato L, *et al.* Fluorescence imaging spectrometer (FLORIS) for ESA FLEX mission [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(7):649.
- [19] Parks R E, Kuhn W P. Optical alignment using the Point Source Microscope [C]// *International Society for Optics and Photonics*, 2005:58770B-58770B-15.
- [20] Reimers J, Thompson K, Whiteaker K L, *et al.* Spectral full-field displays for spectrometers [C]// *International Society for Optics and Photonics*, 2014:929300-929300-5.