

文章编号 1004-924X(2014)09-2321-08

基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪

张 晶^{1,2}, 薛庆生^{1*}, 曹佃生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: 为了满足高分辨率大相对孔径宽波段高光谱成像仪的要求, 提出并设计了一种基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪。基于几何像差理论, 推导出了像散校正条件, 利用 Matlab 软件编制了初始结构参数快速计算程序。作为实例, 设计了一个相对孔径为 1/2.5, 波段为 350~1 000 nm 的平面光栅光谱仪光学系统。利用自己编制的 Matlab 程序计算了初始结构参数, 然后利用光学设计软件 ZEMAX-EE 对该光谱仪的光学系统进行了光线追迹和优化设计, 并对设计结果进行分析。结果表明, 在整个工作波段(350~1 000 nm)内, 点列图半径均方根值小于 8.2 μm , 实现了大相对孔径宽波段像散同时校正, 在宽波段内同时获得了良好的成像质量, 满足了设计指标要求。所提出的基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪在高光谱遥感领域很有应用前景。

关键词: 光学设计; 平面光栅光谱仪; Schwarzschild 结构; 高光谱成像仪

中图分类号: TH744.1; TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2321

Plane grating spectrometer based on double Schwarzschild structures

ZHANG Jing^{1,2}, XUE Qing-sheng^{1*}, CAO Dian-sheng¹

(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*)
** Corresponding author, E-mail: xueqs_ciomf@163.com*

Abstract: To satisfy the requirements of a high-resolution hyperspectral imager with a large relative aperture and a wide spectral region, a new type plane grating spectrometer was proposed and designed based on double Schwarzschild structures. The astigmatism-correcting condition was derived based on the theory of geometrical aberration. The initial parameter computing was programmed by using Matlab software. As an example, an optical system for the plane grating spectrometer with a relative aperture of 1/2.5 operating in 350—1 000 nm was designed. The initial parameters were computed using proposed Matlab program, then the ray tracing and optimization for the spectrometer system were performed with ZEMAX-EE software. The analyzed results demonstrate that the spot radius (Root Mean Square, RMS) is less than 8.2 μm in the whole working waveband (from 350 nm to 1 000 nm), the astigmatism-corrected is realized, and good imaging quality is obtained in a wide spectral region with a large relative aperture. Obtained data satisfy the requirements of design

收稿日期: 2013-07-10; 修订日期: 2013-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41105014); 中科院长春光机所领域前沿创新项目

specifications, and prove the feasibility of the new type plane grating spectrometer base on double Schwarzschild structures. It has extensive application prospects in spaceborne and airborne hyperspectral remote sensing fields.

Key words: optical design; plane grating spectrometer; Schwarzschild structures; hyperspectral imager

1 引言

高空间分辨率和高光谱分辨率的高光谱成像仪(以下简称高分辨率高光谱成像仪)是在多光谱遥感技术基础上发展起来的新一代航天和航空光学遥感仪器,它能以高分辨率同时获取目标的空间和光谱信息,因此在航天和航空光学遥感中具有独特优势^[1-4]。高分辨率高光谱成像仪普遍采用推扫工作方式,一次获得目标的一个条带(穿轨方向)的空间和光谱信息,然后沿飞行器运动方向的推扫,获取沿轨方向目标的空间和光谱信息。高分辨率高光谱成像仪的光学系统由望远镜和光谱仪两部分组成,望远镜把目标的一个条带成像在光谱仪的入射狭缝上,接着由光谱仪进行色散并分波长成像在面阵探测器上^[5-7]。

高分辨率高光谱成像仪的光谱分辨率完全由光谱仪决定,空间分辨率也与光谱仪密切相关,因此,光谱仪是高分辨率高光谱成像仪的核心,它采用的光学结构将直接影响整个高分辨率高光谱成像仪的性能、体积和重量^[8]。目前,较典型的光谱仪有 Offner 光谱仪^[9]和改进型 Czerny-Turner 光谱仪^[10]。Offner 光谱仪由两块凹面反射镜和一块凸面光栅组成,由于采用了同心对称原理;因此可以获得较大的相对孔径(1/3)和良好的成像质量,同时谱线弯曲和谱带弯曲^[11]都较小,便于光谱定标和辐射定标;但其凸面光栅的制作非常困难,价格昂贵且衍射效率低。传统的 Czerny-Turner 结构由两块球面反射镜和一块平面光栅组成,是单色仪中最常用的光学结构,但它在狭缝高度方向存在很大的像散,严重影响沿狭缝高度方向的空间分辨率。为了校正像散,改进型 Czerny-Turner 光谱仪被提出并在高分辨率高光谱遥感中发挥了一定的作用。改进型 Czerny-Turner 光谱仪所采用的平面光栅加工工艺成熟,价格低且衍射效率高,缺点是相对孔径小(小于 1/5)。

海洋水色遥感和大气遥感等领域迫切需要高分辨率大相对孔径宽波段的高光谱成像仪,因为相对孔径越大,仪器的集光能力就越强,信噪比就

越高;仪器的波段越宽,获取的光谱信息越多,可探测的物质种类就越多。为满足高分辨率大相对孔径宽波段高光谱成像仪的要求,克服 Offner 光谱仪中凸面光栅加工困难和改进型 Czerny-Turner 光谱仪相对孔径小的缺点,本文提出一种基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪,并根据几何像差理论分析了该系统的像散校正条件。该光谱仪由 Schwarzschild^[12]型准直和成像镜及平面衍射光栅组成,具有制作简单,相对孔径大等特点,在航空和航天高光谱遥感领域具有广泛的应用前景。

2 像散校正条件

传统的 Schwarzschild 结构^[13]是由两个球面镜组成的成像装置,可用于光束准直系统(也称为 Schwarzschild 物镜),如图 1(a)所示;也可用于光束聚焦系统(也称为倒 Cassegrainian 望远镜),如图 1(b)所示。传统的 Schwarzschild 结构采用轴上点照明,即成像光束中心沿着光轴入射,此时,反射光束会造成中心遮拦。

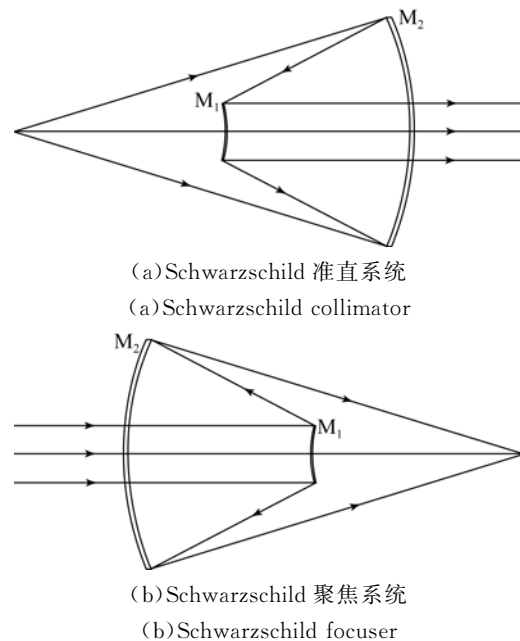


图 1 Schwarzschild 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of Schwarzschild system

海洋水色遥感和大气遥感等弱信号探测领域要求高光谱成像仪具有大相对孔径和强集光能力,为了匹配望远镜的大相对孔径,需要增大基于双 Schwarzschild 结构的光谱仪的相对孔径。为避免中心遮拦,本文采用离轴照明方式,如图 2 所示。 h 为离轴量, θ_1 为反射镜 M_1 的离轴角, θ_2 为反射镜 M_2 的离轴角。 R_1, R_2 分别为反射镜 M_1 和 M_2 的曲率半径, C 为反射镜 M_1 和 M_2 的曲率中心,以曲率中心 C 为原点建立直角坐标系 yCz 。由于相对孔径增大,为了避免拦光,离轴量也要增大,像差校正的难度也增大。

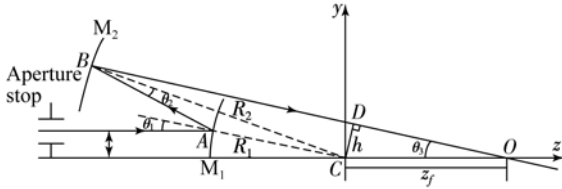


图 2 离轴入射 Schwarzschild 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Schwarzschild system with off-axis illumination

根据几何关系可知:

$$h = R_1 \sin \theta_1. \quad (1)$$

对三角形 ABC 运用正弦定理得:

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

把式(1)代入式(2),并根据几何关系可得:

$$h = R_1 \sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2 = z_f \sin \theta_3, \quad (3)$$

式中: z_f 为弧矢焦点 O 与曲率中心 C 之间的距离,即弧矢焦距; θ_3 为出射光线与 z 轴的夹角。由几何关系可知, θ_1, θ_2 和 θ_3 之间满足:

$$\theta_3 = 2(\theta_1 - \theta_2). \quad (4)$$

纸面内的光线为子午光线,子午光线的交点为子午焦点,本文通过几何方法来推导子午焦点的坐标 (y_m, z_m) 。直线 OB 在直角坐标系 yCz 中表示为:

$$y \cos \theta_3 + z \sin \theta_3 = h. \quad (5)$$

子午面内的入射光线不同,对应的离轴量 h 也不同。式(5)两边对 h 求微分得:

$$\frac{dy}{dh} \cdot \cos \theta_3 - y \sin \theta_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dh} + \frac{dz}{dh} \cdot \sin \theta_3 + z \cos \theta_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dh} = 1. \quad (6)$$

离轴量接近 h 的光线,其离轴量差别 Δh 为小量的条件下满足:

$$\frac{dy}{dh} = \frac{dz}{dh} = 0. \quad (7)$$

把式(7)代入式(6)得:

$$(-y \sin \theta_3 + z \cos \theta_3) \cdot \frac{d\theta_3}{dh} = 1. \quad (8)$$

式(4)两边对 h 求微分得:

$$\frac{d\theta_3}{dh} = 2 \left(\frac{d\theta_1}{dh} - \frac{d\theta_2}{dh} \right). \quad (9)$$

根据式(3)得:

$$\frac{d\theta_1}{dh} = \frac{1}{R_1 \cos \theta_1}, \quad (10)$$

$$\frac{d\theta_2}{dh} = \frac{1}{R_2 \cos \theta_2}. \quad (11)$$

把式(3)、式(10)和式(11)代入式(9)得:

$$\frac{d\theta_3}{dh} = \frac{2}{h} (\tan \theta_1 - \tan \theta_2). \quad (12)$$

式(5)是离轴量为 h 的子午光线的方程,式(8)是离轴量为 $h+dh$ 的子午光线的方程,因此,式(8)和式(5)的联立解为不同子午光线的交点坐标,即为子午焦点的坐标。把式(12)代入式(8)并与式(5)联立求解得到子午焦点的坐标为:

$$y_m = h \left[\cos \theta_3 - \frac{\sin \theta_3}{2(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)} \right], \quad (13)$$

$$z_m = h \left[\sin \theta_3 + \frac{\cos \theta_3}{2(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)} \right]. \quad (14)$$

弧矢焦点 O 的坐标为: $y_s = 0, z_s = h/\sin \theta_3$,像散用子午焦点和弧矢焦点之间的距离 Δr 表示:

$$\begin{aligned} \Delta r &= \sqrt{(y_m - y_s)^2 + (z_m - z_s)^2} = \\ &= h \left[\frac{1}{2(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)} - \frac{1}{\tan \theta_3} \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

要校正像散,就要使 $\Delta r = 0$,又因为 $h \neq 0$,从式(15)可知,像散校正条件为:

$$\tan \theta_3 = 2(\tan \theta_1 - \tan \theta_2). \quad (16)$$

把式(4)代入式(16)得:

$$\tan \theta_1 = \frac{\tan[2(\theta_1 - \theta_2)]}{4} \cdot [1 + \sqrt{5 - 4 \tan^2(\theta_1 - \theta_2)}], \quad (17)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{\tan[2(\theta_1 - \theta_2)]}{4} \cdot [-1 + \sqrt{5 - 4 \tan^2(\theta_1 - \theta_2)}]. \quad (18)$$

像散校正条件式(16)是将 Schwarzschild 结构作为聚焦系统得出的。根据光路可逆原理,从 O 点发出的光线经 Schwarzschild 系统后平行于 z 轴出射,因此, Schwarzschild 结构作为准直系统时,像散校正条件式(16)仍然适用。

3 初始结构的确定

平面光栅光谱仪由入射狭缝、准直系统、平面光栅、聚焦系统和像面组成。准直系统和聚焦系统均采用 Schwarzschild 结构,基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪的光学结构原理图如图 3 所示。从入射狭缝中心 O 点发出的光线经第一个 Schwarzschild 结构准直后入射到平面光栅上,经平面光栅色散后,再经第二个 Schwarzschild 结构分波长聚焦成像到像面上。双 Schwarzschild 结构共用一个凸面镜 $M_{1(1')}$,两个凹面镜 $M_{2(2')}$ 具有相同的曲率半径。入射狭缝的长度方向和光栅刻线垂直于 xOz 平面,平面光栅为孔径光阑。平面光栅光谱仪的基本参数有波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、 $F/\#$ 、狭缝长度 $2h_s$ 和系统色散宽度 Δp 。首先选择光栅的衍射级次 m 、刻线密度 g 和入射光线与 z 轴的夹角 ω 来设计波长 λ_c 。根据光栅方程:

$$\sin(\alpha + \omega) + \sin(\alpha - \omega) = mg\lambda_c, \quad (19)$$

其中: $\alpha + \omega = \theta_g$ 为光栅入射角, $\alpha - \omega = \theta'_g$ 为光栅

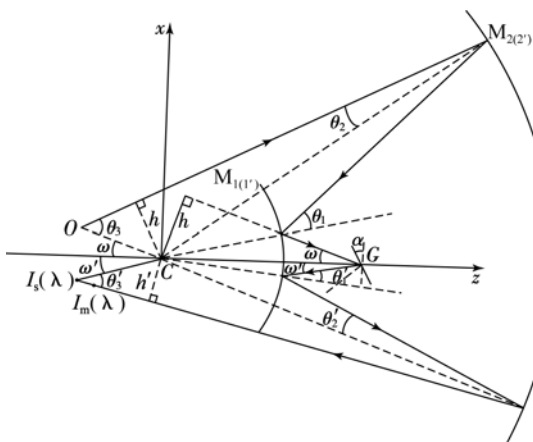


图 3 基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪光学原理图

Fig. 3 Schematic diagram of plane grating spectrometer based on double Schwarzschild structures

衍射角。光栅的旋转角度 α 为:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{mg\lambda}{2\cos\omega} \right]. \quad (20)$$

根据式(20)确定光栅旋转角度 α ,进而可确定 θ'_g 。

把凸面反射镜 M_1 和凹反射镜 M_2 看作两个相隔距离为 $d_1 = R_2 - R_1$ 的透镜,则总焦距 f' 为:

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 + d_1}, \quad (21)$$

式中: $f'_1 = -R_1/2$ 为凸面反射镜 M_1 的焦距, $f'_2 = -R_2/2$ 为凹面反射镜 M_2 的焦距。 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的光谱辐射在像面上的色散宽度 Δp 为:

$$\Delta p = f' \cdot \frac{mg}{\cos\theta'_g} \cdot (\lambda_2 - \lambda_1). \quad (22)$$

衍射级次 m 一般取 1。由式(22)确定准直(聚焦)系统的焦距 f' ,选择凸面反射镜 $M_{1(1')}$ 的曲率半径 R_1 ,根据式(21)确定凹面镜 $M_{2(2')}$ 的曲率半径 R_2 。

根据几何关系,离轴量 h 为:

$$h = (d + R_1) \sin\omega \quad (23)$$

已知凸面镜 $M_{1(1')}$ 的顶点与平面光栅中心之间的距离 d ,根据式(23)确定离轴量 h 。根据式(3),光栅在 $M_{1(1')}$ 上的入射角度 θ_1 为:

$$\theta_1 = \arcsin(h/R_1). \quad (24)$$

再根据式(17)得:

$$\tan(\theta_1 - \theta_2) = \frac{\tan\theta_1 \sqrt{5 + 4 \tan^2\theta_1} - 1}{2(1 + \tan^2\theta_1)}. \quad (25)$$

则入射角 θ_2 为:

$$\theta_2 = \theta_1 - \arctan \left[\frac{\tan\theta_1 \sqrt{5 + 4 \tan^2\theta_1} - 1}{2(1 + \tan^2\theta_1)} \right]. \quad (26)$$

Schwarzschild 准直系统的焦长 z_1 为:

$$z_1 = h / \sin\theta_3. \quad (27)$$

物点坐标为:

$$y_0 = z_1 \sin\omega \quad (28)$$

$$z_0 = -z_1 \cos\omega \quad (29)$$

根据式(4)、式(24)、式(26)~式(28),利用 Matlab 软件编制了基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪初始结构参数的快速计算程序,程序框图如图 4 所示。

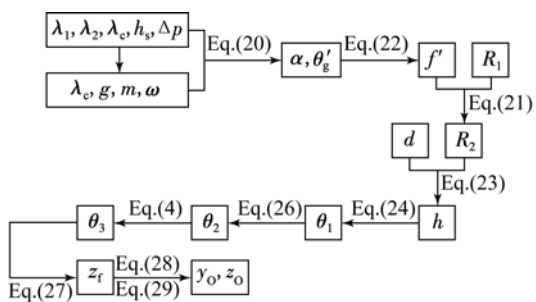


图 4 初始结构参数计算程序框图

Fig. 4 Program block for computing initial structure parameters

5 设计实例及设计结果分析

5.1 设计实例

根据已论述的像散校正条件和初始结构参数确定方法,设计了一个基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪,波段为 350~1 000 nm,即 $\lambda_1=350\text{ nm}$, $\lambda_2=1\ 000\text{ nm}$,中心波长 $\lambda_c=675\text{ nm}$,入射狭缝尺寸为 $12\text{ mm}\times 26\ \mu\text{m}$,即 $h_s=6\text{ mm}$, $F/\#=2.5$,采用的面阵探测器的像元尺寸为 $26\ \mu\text{m}\times 26\ \mu\text{m}$,像元数为 512×512 。焦面上色散宽度 $\Delta p=11\text{ mm}$,光谱分辨率为 1.6 nm 。平面光栅由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光栅中心生产,光栅刻线密度 g 为 150 g/mm ,衍射级次 m 取 1 级,光栅的入射光线与 z 的夹角 ω 取 10° ,凸面镜 $M_{1(1')}$ 的曲率半径 R_1 取 120 mm , $M_{1(1')}$ 顶点与平面光栅顶点之间的距离 d 取 80 mm 。首先,利用自己编制的 Matlab 程序计算初始结构参数,结果如表 1 所示。然后将初始结构参数导入光学设计软件 ZEMAX-EE 中进行优化设计。优化设计时,为进一步校正高级像差,提高成像质量,把凸面反射镜 $M_{1(1')}$ 和凹面反射镜 M_2 , $M_{2'}$ 非球面化, k_1 , k_2 和 k_2' 分别为 $M_{1(1')}$ 、 M_2 、 $M_{2'}$ 的二次曲面常数,优化设计得到的光学结构参数如表 1 所示。图 5 为优化设计的基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪的光学结构图。

表 1 基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪光学参数

Tab. 1 Optical parameters of plane grating spectrometer based on double Schwarzschild structures

Specifications	Parameters	
	Initial	Optimized
f/mm	111.947	111.947
$\alpha/^\circ$	2.925	2.866
$\theta'_g/^\circ$	-7.075	-7.134
R_2/mm	258.603	258.601
h/mm	34.730	34.685
$\theta_1/^\circ$	16.823	16.791
$\theta_2/^\circ$	6.489	6.432
$\theta_3/^\circ$	20.667	20.513
z_f/mm	98.400	98.411
y_o/mm	17.087	16.902
z_o/mm	-96.905	-97.018
k_1	0	-0.649 11
k_2	0	-0.761 31
k_4	0	0.164 05

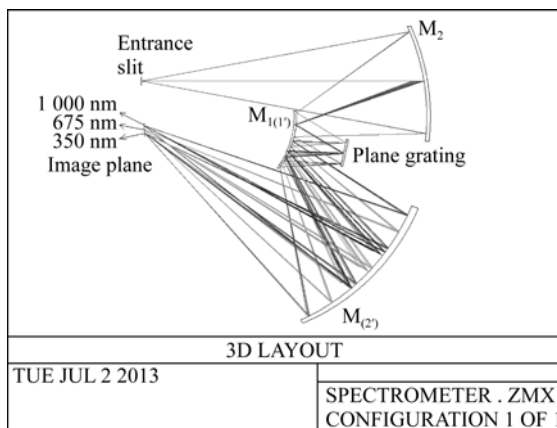


图 5 基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪光路图

Fig. 5 Layout of plane grating spectrometer based on double Schwarzschild structures

5.2 设计结果分析

图 6 为不同视场的点列图半径的 RMS 值随波长的变化曲线。从图 6 可以看出,在整个工作波段内,点列图半径的 RMS 值随波长的变化不大,均小于 $8.2\ \mu\text{m}$,小于探测器像元尺寸的一半

(13 μm)。图 7 为不同波长的光学传递函数 (MTF) 曲线。由图 7 可知,不同波长的 MTF 在探测器的 Nyquist 频率 19.2 lp/mm 处均大于 0.7,满足 $\text{MTF} > 0.5$ 的设计指标要求。

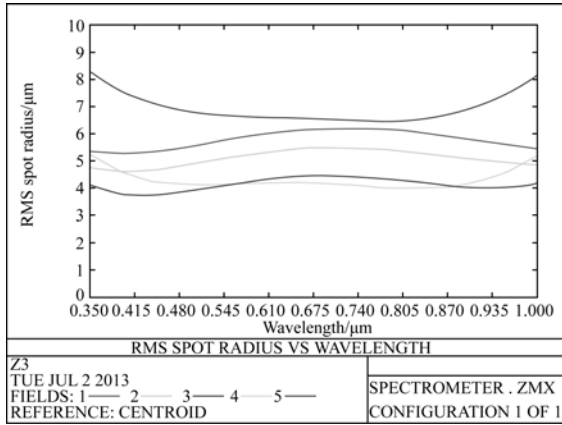
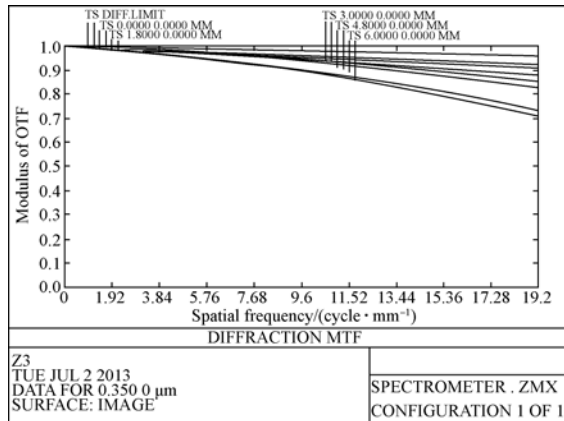


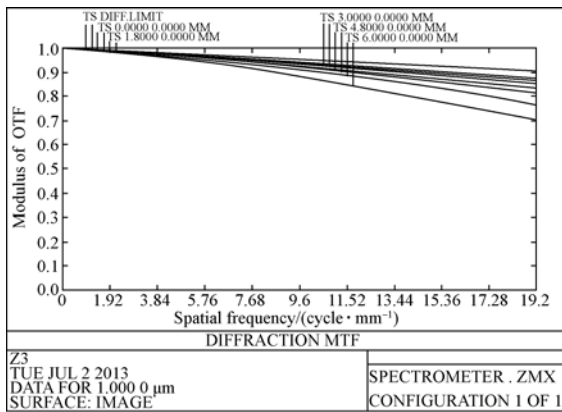
图 6 点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线
Fig. 6 RMS spot radius versus wavelength



(c) 边缘波长 350 nm
(c) Marginal wavelength of 350 nm

图 7 不同波长的光学传递函数(MTF)曲线
Fig. 7 MTFs at different wavelengths

图 8 为不同波长的谱线弯曲,图 9 为不同视场的谱带弯曲。



(a) 边缘波长 1 000 nm
(a) Marginal wavelength of 1 000 nm

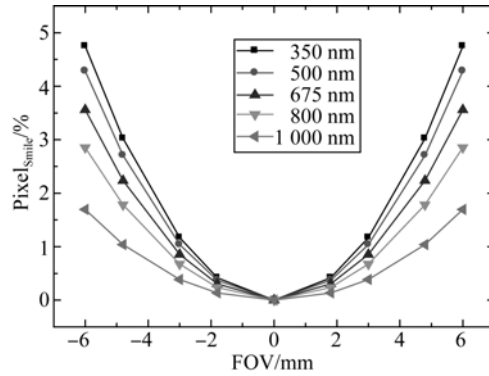
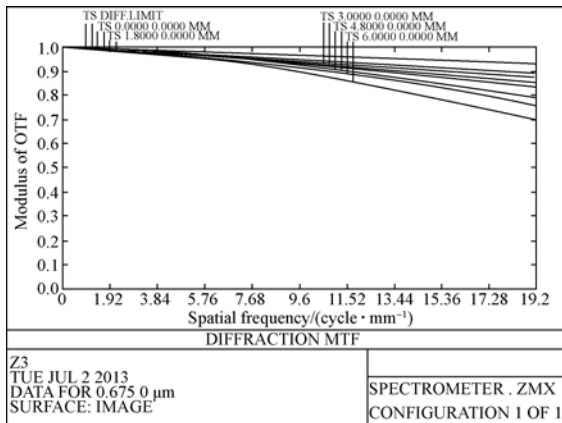


图 8 不同波长的谱线弯曲
Fig. 8 Total smiles at different wavelengths



(b) 中心波长 675 nm
(b) Central wavelength of 675 nm

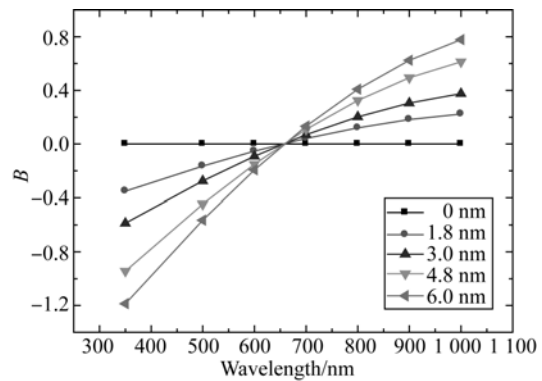


图 9 不同视场的谱带弯曲
Fig. 9 Keystones in different fields of views

从图 8 可以看出,谱线弯曲量关于中心视场对称,随着波长的减小,谱线弯曲量增大,但最大谱线弯曲量仅为 4.75% 个像元。从图 9 可以看出,随着视场的增大,谱带弯曲量也在增大,同一视场,边缘波长的谱带弯曲量大于中心波长的谱带弯曲量,最大谱带弯曲量小于 1.2% 个像元,在光谱定标和辐射定标时可忽略。从分析结果可以看出,基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪在整个工作波段内获得了良好的成像质量,也证明了前文提出的设计方法是可行的。此平面光栅光谱仪的光学系统结构非常紧凑,体积仅为: 370 mm × 350 mm × 96 mm。这种基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪系统满足大相对孔径、宽波段高光谱成像仪的要求,并且体积小、质量轻,适合航空和航天遥感应用。

参考文献:

- [1] 郑玉权,高志良. CO₂ 探测仪光学系统设计 [J]. 光学精密工程,2012,20(12):2645-2653.
ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of CO₂ sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2645-2653. (in Chinese)
- [2] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪发展现状 [J]. 中国光学,2011,4(6):546-561.
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 546-561. (in Chinese)
- [3] 薛庆生. 星载宽波段远紫外高光谱成像仪光学系统设计 [J]. 光学学报,2013,33(3):0322001-1-7.
XUE Q SH. Optical system design of a spaceborne broadband far ultraviolet hyperspectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0322001-1-7. (in Chinese)
- [4] 刘倩倩,郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况 [J]. 中国光学,2012,5(6):566-577.
LIU Q Q, ZHENG Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 566-577. (in Chinese)
- [5] 赵敏杰,司福祺,江宇,等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标 [J]. 光学精密工程,2013,21(3):567-573.

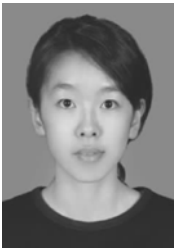
6 结 论

本文提出了一种基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪。基于几何像差理论推导出了像散校正条件,并编制了初始结构参数快速计算程序。实验设计了一个波段为 350~1 000 nm 的宽波段像差同时校正的平面光栅光谱仪,利用光学设计软件 ZEMAX-EE 对该光谱仪进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行了分析。分析结果表明,在整个工作波段(350~1 000 nm)内,全视场的光学传递函数均达到 0.7 以上,实现了宽波段像差的同时校正,在宽波段内还获得了良好的成像质量,完全满足成像质量的要求。本文所提出的基于双 Schwarzschild 结构的平面光栅光谱仪是可行的,该仪器为航天、航空高分辨率高光谱成像奠定了技术基础。

- ZHAO M J, SI F Q, JIANG Y, *et al.*. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 567-573. (in Chinese)
- [6] 赵慧洁,程宣,张颖. 用于火星探测的声光可调谐滤波器成像光谱仪 [J]. 光学精密工程,2012,20(9):1945-1952.
ZHAO H J, CHENG X, ZHANG Y. Design of acousto-optic imaging spectrometer for mars exploration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1945-1952. (in Chinese)
- [7] 安岩,孙强,刘英,等. 交叉型消像散 Czerny-Turner 结构光谱仪设计 [J]. 中国光学,2012,5(5):470-475.
AN Y, SUN Q, LIU Y, *et al.*. Design of astigmatism-free crossed Czerny-Turner spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 470-475. (in Chinese)
- [8] 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.
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 650-657. (in Chinese)
- [9] 刘旭霞,季铁群,贺虎成,等. Littrow-Offner 型分光系统的分析与设计 [J]. 光学学报,2013,33(4):0422009-1-6.
LIU X X, JI Y Q, HE H CH, *et al.*. Analysis and design of Littrow-Offner spectroscopic system [J].

- Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422009-1-6.
(in Chinese)
- [10] 薛庆生, 陈伟. 改进的宽谱段车尔尼-特纳光谱成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 233-240.
XUE Q SH, CHEN W. Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system with wide spectral region [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 233-240. (in Chinese)
- [11] PANTAZIS M. Spectral and spatial uniformity in pushbroom imaging spectrometers [J]. *SPIE*, 1999, 3753: 311-350.
- [12] 胡大伟, 李艳秋, 刘晓林. 超高数值孔径 Schwarzschild 投影光刻物镜的光学设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122004-1-7.
HU D W, LI Y Q, LIU X L. Optical design of hyper numerical-aperture Schwarzschild projection lithographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122004-1-7. (in Chinese)
- [13] IGOR A A, KIRILL, KRYMSKI M. Schwarzschild objective for soft x-rays [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(8): 2163-2170.

作者简介:



张 晶(1987—),女,吉林白山人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间紫外大气遥感探测仪方面的研究。E-mail: qingjing500@sina.com

通讯作者:



薛庆生(1979—),男,山东梁山人,博士,副研究员,硕士生导师,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计、航空和航天遥感成像光谱技术及光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: xueqs_ciomp@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)