

doi: 10.3788/gzxb20164504.0412002

# 基于倾斜场镜的 C-T 成像光谱仪优化设计

郝爱花<sup>1</sup>, 胡炳樑<sup>2</sup>, 李立波<sup>2</sup>, 李芸<sup>2</sup>

(1 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

(2 中科院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术实验室, 西安 710119)

**摘要:** 残留谱线弯曲限制了切尔尼-特纳平面光栅光谱仪在成像光谱仪中的应用。本文不同于传统的基于棱镜的光栅谱线弯曲补偿方法, 提出了基于倾斜场镜的补偿方法, 即在校正场曲的同时对入射到场镜不同区域, 不同波长的狭缝像分别进行谱线弯曲校正, 且没有改变系统的其它光学特性。对狭缝大小为  $7.8 \text{ mm} \times 0.016 \text{ mm}$ 、光谱范围  $0.31 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 、光谱分辨率  $0.4 \text{ nm}$ 、物方焦距  $70 \text{ mm}$ 、 $1:1$  放大倍率的切尔尼-特纳成像光谱仪进行了优化设计, 结果全谱段、全视场  $\text{MTF} > 0.8$ , 点列图 RMS 半径小于  $9 \mu\text{m}$ , 相对谱线弯曲小于  $0.2\%$ , 满足设计要求。实际设计表明该方法对于可选用光学玻璃有限, 且能量较弱的紫外光学系统是一种可选的优化设计方法。

**关键词:** 光学设计; 光栅光谱仪; 场镜; 谱线弯曲; 切尔尼-特纳; 紫外; 石英

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0412002-5

## Optimization Design of C-T Imaging Spectrometer Based on the Tilt Field Len

HAO Ai-hua<sup>1</sup>, HU Bing-liang<sup>2</sup>, LI Li-bo<sup>2</sup>, LI Yun<sup>2</sup>

(1 School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Residual smile limits the application of Czerny-Turner plane grating spectrometer in the imaging spectrometer. In this paper, different from the traditional method of smile correction based on prism, a method is proposed, which is based on the tilt field mirror. The field curve is corrected, at the same time, the different wavelength slit images in different regions of the field lens are corrected, and the other optical properties of the system are not changed. The Czerny Turner imaging spectrometer slit is  $7.8$  millimeter length and  $0.016$  millimeter wide, spectral range from  $0.31$  to  $0.5$  microns, spectral resolution  $0.4$  nanometers, the object focal length  $70$  millimeters,  $1:1$  magnification. Optimization design results,  $\text{MTF}$  over  $0.8$ , RMS spot radius less than  $9$  microns, the relative smile less than  $0.2\%$ , meet the design requirements. It shows that the method can be used in the systems with weak signal and low transmittance optical glass.

**Key words:** Optical design; Grating imaging spectrometer; Field lens; Smile; Czerny-Turner; UV; Silica

**OCIS Codes:** 120.6200; 300.0300; 080.0080; 110.0110; 220.0220

## 0 引言

由于太阳紫外光谱辐射变化剧烈, 并伴有较多的谱线, 一般对探测光谱仪的光谱分辨率要求比较高, 需达到  $1 \text{ nm}$  左右<sup>[1]</sup>。此外, 能够透过大气传输的紫外波段 ( $310 \sim 500 \text{ nm}$ ) 辐射能量很弱; 同时, 满足该波段高

透过率、化学性能稳定的光学材料有限。这两个原因使得具有高光谱分辨率的反射式光栅光谱仪成为该波段的首选结构。

在反射式光栅光谱仪中, 有平面光栅光谱仪、凹面光栅光谱仪和凸面光栅光谱仪。切尔尼-特纳 (Czerny-Turner, C-T) 成像光谱仪作为一种平面光栅光谱仪, 具

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11327303) 资助

第一作者: 郝爱花 (1977-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光谱仪技术与信息处理技术。Email: haoaihua@xupt.edu.cn

收稿日期: 2015-10-28; 录用日期: 2016-01-11

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

有对称结构、无非球面镜、结构紧凑的特点;凹面和凸面光栅光谱仪中以具有同心结构的 Offner 光栅光谱仪和 Dyson 光栅光谱仪为代表,同心结构的光栅光谱仪因体积小、重量轻、孔径大、谱线弯曲和色畸变小等优点备受青睐,但光谱仪中的光栅会导致像散,在校正像散过程中使其同心结构受到破坏.此外,Offner 光栅光谱仪同 C-T 光栅光谱仪类似,为了避免光路的遮拦,孔径不大,但谱线弯曲和色畸变比较大<sup>[2]</sup>.而 Dyson 光栅光谱仪采用折反混合结构,无需考虑光路遮拦,可以获得大孔径、高质量的成像.美中不足的是大的平凸厚透镜的引入会引起能量的强烈吸收,必须采用高透过率的光学材料,另外,折射材料的应用会引入色差,带来谱线弯曲和色畸变,对于短波段影响尤其严重<sup>[3]</sup>.基于上述考虑,紫外波段,在信噪比计算合理的情况下<sup>[4]</sup>,选用结构紧凑、工艺简单、成本低廉、像差易于校正的 C-T 成像光谱仪是最佳选择.

C-T 光栅光谱仪为了避免光路遮拦,采用离轴结构.球面镜离轴会引入像散,对 C-T 像散的研究在方法和理论上较为成熟.基于发散照明光栅的消像散方法<sup>[5-7]</sup>在没有引入任何辅助光学元件和非球面镜情况下,仅依赖发散照明条件下光栅的像散补偿作用来校正像散,结构简单,成本低廉,有明显优势.文献<sup>[4]</sup>表明,当光谱范围和视场增大时,不同波长入射光线引起的像面弯曲和色畸变使得谱线弯曲和边缘视场的成像质量严重变差.为解决此问题,本文采用倾斜场镜在进行平场设计的同时进行了谱线弯曲校正,使得 C-T 光栅光谱仪能够实现较大视场的高质量成像.

## 1 C-T 成像光谱仪像差校正基本原理

### 1.1 C-T 成像光谱仪的成像过程

C-T 成像光谱仪光路如图 1,图中 S 为入射狭缝, $M_1$  为准直球面镜, $\theta_c$ 、 $R_c$  为准直镜的离轴角和半径;G

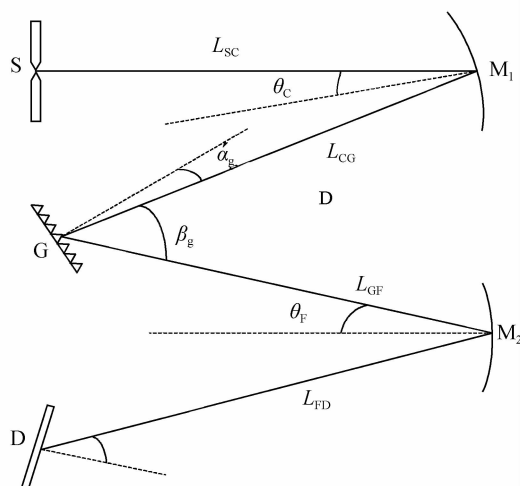


图 1 C-T 光谱仪光路  
Fig. 1 C-T spectrometer layout

为光栅, $\alpha_g$ 、 $\beta_g$  为光栅的入射角和衍射角; $M_2$  为成像镜, $\theta_f$ 、 $R_f$  为成像镜的离轴角和半径, $\theta_D$  为探测器 D 的偏转角.此外, $L_{sc}$ 、 $L_{cg}$ 、 $L_{gf}$  分别为狭缝到准直镜的距离、准直镜到光栅的距离以及光栅到成像镜的距离, $L_{fd}$  为成像镜到探测器的距离.

狭缝 S 位于准直透镜  $M_1$  的前焦点附近,S 发出的发散光束经  $M_1$  准直后照明衍射光栅 G,经光栅衍射后的光束再被会聚球面镜成像在探测器 D 上.对于非平行光束像散校正设计,狭缝发出的发散光束经准直透镜成像后成会聚或发散的光束照明衍射光栅.

### 1.2 C-T 成像光谱仪的基本像差校正

C-T 成像光谱仪的球差可以根据瑞利判据控制每一个球面镜的球差在合理的范围内,从而达到控制整个系统球差的目的.校正球差球面镜的相对孔径须满足<sup>[8]</sup>

$$f' \leq 256\lambda F^4 \quad (1)$$

C-T 成像光谱仪慧差校正可以依据 Shafer Equation<sup>[9-11]</sup>慧差校正条件

$$\frac{R_f}{R_c} = \left[ \frac{\sin \theta_f}{\sin \theta_c} \left( \frac{\cos \beta_g}{\cos \alpha_g} \right)^3 \right]^{1/2} \quad (2)$$

进行校正.从式(2)可以看出,慧差的校正可以通过调节准直镜、成像镜的离轴角,以及光栅的方位角来进行消除.但式(2)仅仅能够满足中心波长的慧差校正,随波长的变化,光栅衍射角和成像镜离轴角将发生变化,使得除了中心波长,其它波长处的慧差并没有完全消除.陈<sup>[12]</sup>等人对宽波段范围内的慧差进行了理论分析,指出在低波长至中心波长范围内,总慧差近似保持不变,即近似为零;在中心波长至高波长范围内,总慧差有一定程度的递增,但不是很大.

至于像散,非平行光束照明条件下,C-T 光谱仪的准直镜和成像镜具有相同的像散效应,而衍射光栅产生的像散可以在一定条件下补偿准直镜和成像镜产生的像散. $\cos^2 \beta_g / \cos^2 \alpha_g < 1$ ,发散照明光栅可以补偿像散;相反, $\cos^2 \beta_g / \cos^2 \alpha_g > 1$ ,会聚照明可以补偿像散<sup>[7]</sup>.中心波长处的像散校正条件,即零阶像散校正条件为

$$L_{sc} = \frac{0.5R_c R_f \left( \frac{\cos^2 \alpha_g}{\cos^2 \beta_g} - 1 \right)}{R_c (\sec \theta_f - \cos \theta_f) + R_f \left( \frac{\cos^2 \alpha_g}{\cos^2 \beta_g} \sec \theta_c - \cos \theta_c \right)} \quad (3)$$

参考文献<sup>[6]</sup>,与色散有关的一阶像散校正可以通过优化  $\theta_D$  和  $L_{gf}$  实现.

由于不同波长的衍射光线相对成像镜的离轴角不同,故不同波长的焦距不同,因而成像焦面会存在一定的场曲.焦面场曲可以通过在焦平面附近增加平场透镜进行校正.

## 2 C-T 成像光谱仪的谱线弯曲校正

色散型光谱仪有两种,即棱镜型色散型光谱仪和

光栅色散型光谱仪. 由于棱镜色散型光谱仪的谱线弯曲与光栅色散型光谱仪的谱线弯曲方向相反,可以互补,因此很多学者进行了棱镜-光栅混合型成像光谱仪谱线弯曲补偿设计<sup>[13-14]</sup>,但光学系统较为复杂,一般用在能量较强,光学材料易于选择的可见光波段. 此外,由于两者的弯曲变化速率不同,这种补偿也仅能在中心波长实现零弯曲. 本文提出一种新的谱线弯曲校正方法,即基于倾斜场镜的光栅光谱仪谱线弯曲校正方法.

由于场镜位于焦平面附近,经光栅衍射的不同波长的衍射光束经球面镜会聚后,入射到场镜的不同位置,因而不同波长的衍射光束就相当于以不同入射角经过了一个不同厚度、不同顶角的小棱镜,因此对不同波长的衍射光束会产生不同的色散和谱线弯曲. 由于光栅的色散本领远远大于棱镜的色散本领,起主要色散作用的仍为光栅,棱镜色散的非线性将不会影响光栅光谱仪的色散线性特性,但对谱线弯曲却有很好的校正作用. 图 2 为倾斜场镜成像示意图. 从图中可以看出由于场镜靠近焦面,不同波长的成像光束已经分离,假设从上到下波长  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ .

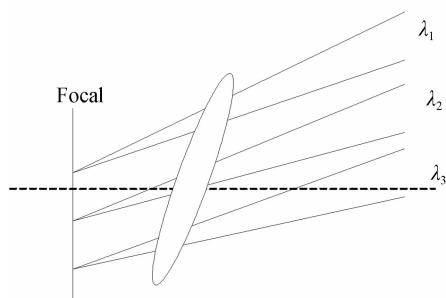
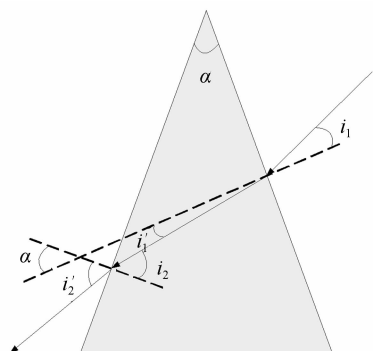
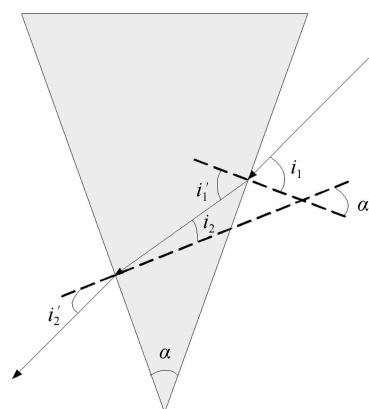


图 2 倾斜场镜成像  
Fig. 2 The tilt field len

分析几种特殊的棱镜色散情况,图 3(a)为入射光束从棱镜上方入射,可以模拟长波  $\lambda_1$  的入射情况;图 3(b)为入射光束从棱镜下方入射,且入射角较大,可以模拟短波  $\lambda_3$  的入射情况. 根据光束折射公式和棱镜几何关系式可以推导上述两种情况的光束衍射公式分别为



(a) Incidence above prism side



(b) Incidence under prism side

图 3 特殊情况棱镜色散示意图

Fig. 3 Special prism dispersion sketch

$$i'_{2a} = \arcsin \{ n \sin [\alpha + \arcsin (\sin i_1 / n)] \} \quad (4)$$

$$i'_{2b} = \arcsin \{ n \sin [\arcsin (\sin i_1 / n) - \alpha] \} \quad (5)$$

为了区别(a)、(b)两种情况,衍射角下标用 a、b 区分.

对于狭缝边缘的入射光线,可以推导出其在主截面内分量的衍射公式与狭缝中点的衍射公式类似,仅仅是折射率用  $N$  代替, $N$  是与缝高有关的量,称为假定折射率

$$N = \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \tan^2 \beta_1} \quad (6)$$

式中  $\beta_1 = z/f'$  是与缝高  $Z$  有关的量, $f'$  为会聚透镜的焦距. 相应的狭缝边缘点的衍射公式分别为

$$i'_{2\beta a} = \arcsin \{ N \sin [\alpha + \arcsin (\sin i_{1\beta} / N)] \} = \arcsin \{ \sin \alpha \sqrt{N^2 - \sin^2 i_{1\beta}} + \cos \alpha \sin i_{1\beta} \} \quad (7)$$

$$i'_{2\beta b} = \arcsin \{ N \sin [\arcsin (\sin i_{1\beta} / N) - \alpha] \} = \arcsin \{ \sin i_{1\beta} \cos \alpha - \sqrt{N^2 - \sin^2 i_{1\beta}} \sin \alpha \} \quad (8)$$

式中  $i_{1\beta}$  和  $i'_{2\beta}$  为狭缝边缘光线入射角和衍射角在主截面内的投影,如图 4 所示. 从式(6)~式(8)可以看出谱线弯曲量的大小不仅取决于折射率  $N$ 、入射角  $i_{1\beta}$ ,而且还与棱镜顶角  $\alpha$  有关. 对于长波入射的情况,谱线弯向棱镜的底边,且与  $N$ 、 $\alpha$  成正比,且长波所处的位置对应的棱镜顶角  $\alpha$  较大,因此谱线弯曲较大. 而对于短波,谱线弯曲仍弯向棱镜的底边,但同  $N$ 、 $\alpha$  成反比,即短波在此处弯曲量小,且考虑到  $i'_{2\beta}$  本身有限,因此棱镜引起短波弯曲可以忽略. 倾斜棱镜引起的长波产生的谱线弯曲远远大于短波产生的谱线弯曲,且弯曲方向与光栅产生的弯曲相反. 因此,倾斜场镜产生的谱线弯曲可以大大补偿光栅产生的谱线弯曲,使得成像焦面上的谱线弯曲优化限制在合理的范围内. 此外,王<sup>[15]</sup>等人也曾经用倾斜场镜进行了棱镜光谱仪的谱线弯曲校正,只是没有给出详细的理论推导和分析,说明基于倾斜场镜进行色散型光谱仪的谱线弯曲校正是切实可行的.

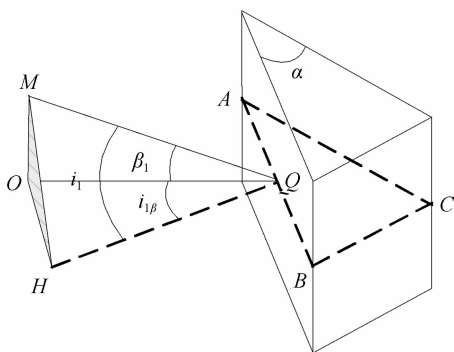


图 4 狭缝边缘光线入射投影

Fig. 4 Incident light projection of slit edge

### 3 光谱成像系统优化设计

光栅成像光谱仪采用 1 : 1 的放大倍率,物方焦距等于像方焦距约 70 mm,光栅频率取 600 lines/mm,狭缝尺寸 7.8 mm×0.016 mm, CCD 像素尺寸 16 μm×16 μm,大小为 512×512. 理论光谱分辨率约 0.4 nm/像元,实际像面平均光谱分辨为 0.35 nm/像元. 光谱仪的光谱范围为 0.31 ~ 0.5 μm,物方数值孔径为 0.083 3.

图 5 为优化设计消谱线弯曲 C-T 成像光谱仪结构,表 1 为光学系统设计参量.

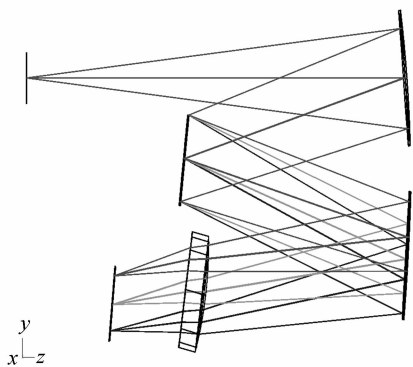


图 5 优化 C-T 光谱成像系统结构

Fig. 5 Optimization layout of C-T imaging spectrometer

表 1 光谱成像系统设计参量

Table 1 Design parameters of Spectral imaging system

Surface serial number	Element	Radius /mm	Thickness /mm	Material
1		Inf	91	
2	Mirror1	-141	-54.6	Mirror
3	Grating	Inf	54.6	Mirror
4	Mirror2	-245.5	-53.2	Mirror
5	Len	-42.3	-5	Silica
6		382.7	-14.9	
Image surface		Inf		

图 6 为各个波段(0.31 μm,0.4 μm,0.5 μm)全狭缝范围内各个视场的 MTF 曲线,传函值全部达到 0.8 以上. 图 7 为各个波长 RMS 点半径随视场的变化曲

线,中心波长均方半径没有超过 6.5 μm,全谱段、全视场最大均方半径没有超过 9 μm. 整个系统畸变小于 0.1%,谱线最大弯曲量小于 16 μm,相对谱线弯曲小于 0.2%. 图 8 为波长 479 nm,480 nm,481 nm 三个波长处狭缝全视场的像面轨迹图,图中每一小格的宽度为 32 μm,可以看出谱线弯曲满足成像质量要求. 因此倾斜场镜设计使得 C-T 光谱仪结构在没有复杂化的前提下,不仅校正了场曲,提高了成像质量,还大大改进了谱线弯曲(这一点可以于前期博士论文的结果做对比)<sup>[4]</sup>,基本满足系统设计要求.

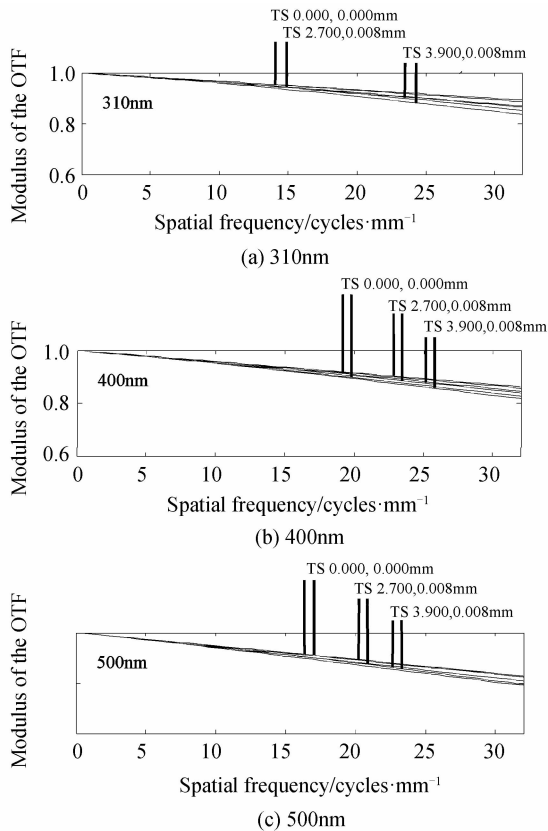


图 6 各个波长在狭缝全视场的传递函数曲线  
Fig. 6 MTF of different wavelengths in full slit view

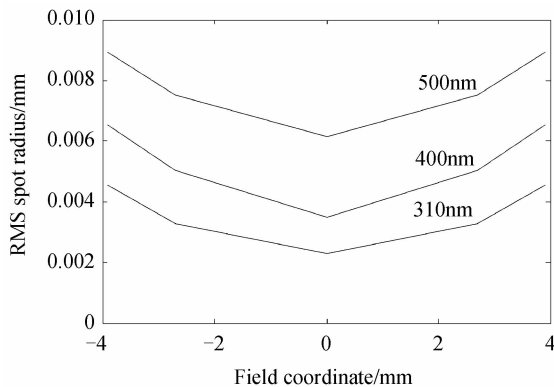


图 7 各波长 RMS 点半径随视场的变化  
Fig. 7 RMS spot radius versus field in different wavelength

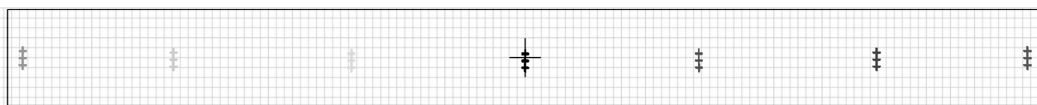


图 8 波长 479 nm,480 nm,481 nm 狭缝全视场的成像轨迹

Fig. 8 The imaging track with wavelength of 479 nm, 479 nm and 481 nm

## 4 结论

理论分析和设计结果显示倾斜场镜在校正场曲的前提下,能够很好地弥补光栅造成的谱线弯曲,且没有影响光学系统的其它成像特性.该方法尽可能少地采用光学元件,全部采用球面设计,减少了加工难度,却起到了别人用很复杂系统才能得到的结果.这一设计正好符合紫外光学系统能量弱,可选用性能稳定光学玻璃少,希望光学系统采用反射式光学元件的初衷,并大大改善了反射式光学系统的成像质量,使得系统设计在视场达到一定要求的情况下仍能给出较为满意的结果.

### 参考文献

- [1] ZHANG Hao, FANG Wei, YE Xin, *et al.* Design of prism spectrometer with wide spectral coverage for solar spectrum measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 0222001. 张浩,方伟,叶新,等. 宽光谱棱镜型太阳光谱仪设计[J]. *光学学报*, 2013, **33**(2): 0222001.
- [2] SUN Jia-yin, LIU Ying, LI Chun, *et al.* Comparative study on performances of long-wave infrared imaging spectrometers based on offner form and dyson form[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(10): 1030003. 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.
- [3] YANG Jin, TANG Yu-guo, Bayanheshig, *et al.* Design of Dyson concentric optical hyperspectral imaging system with achromatized Fery prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **32**(11): 1130003. 杨晋,唐玉国,巴音贺希格,等. 基于同心光学系统的消色差 Fery 棱镜高光谱成像仪的设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(11): 1130003.
- [4] 郝爱花. 大视场宽谱段高分辨机载紫外-可见成像光谱技术研究[D]. 博士学位论文, 2014.
- [5] BATES B, MCDOWELL M, NEWTON A. Correction of astigmatism in a Czerny-Turner spectrograph using a plane grating in divergent illumination[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1970, **3**: 206-210
- [6] AUSTIN D, WITTING T, WALMSLEY I. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(19): 3846-3853.

- [7] HAO Ai-hua, HU Bing-liang. Research and design of astigmatism-free for C-T imaging spectrometer under non-parallel grating illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(7): 2132-2136. 郝爱花,胡炳梁. 非平行光束光栅照明 C-T 成像光谱仪消像散研究与设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(7): 2132-2136.
- [8] LIU Jian-peng, TANG Yi, HUANG Gang, *et al.* Design method of optical system of improved czerny-turner imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322007. 刘健鹏,唐义,黄刚,等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322007.
- [9] SHAFER A, MEGILL L, DROPPLEMAN L. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, **54**(7): 879-887.
- [10] READER J. Optimizing Czerny-Turner spectrographs: a comparison between analytic theory and ray tracing [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, **59**(9): 355-367.
- [11] LINDBLOM P. Theory of the two-mirror Plane-Grating spectrograph [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, **62**(6): 487-498.
- [12] CHEN Tan-xuan, YANG Huai-dong, CHEN Ke-xin. Coma and resolution in wide spectral region Czerny Turner spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(12): 1692-1696. 陈谭轩,杨怀栋,陈科新,等. 宽光谱 Czerny-Turner 光谱仪中的慧差与分辨率[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6): 1692-1696.
- [13] 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.
- [14] YANG Zeng-peng, TANG Yu-guo, Bayanheshig, *et al.* Optimization design method for optical system of prism-grating ultraspectral imaging spectrometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(9): 0911003. 杨增鹏,唐玉国,巴音贺希格,等. 棱镜-光栅组合色散型超光谱成像系统的优化设计[J]. *光学学报*, 2014, **34**(9): 0911003.
- [15] WANG Xin, DING Xue-zhuan, YANG Bo, *et al.* Optical design and spectral calculation of prism spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1334-1339. 王欣,丁学专,杨波,等. 棱镜分光光谱仪的光学系统设计与光谱特性计算[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1334-1339.