

doi: 10. 3788/gzxb20174604. 0422003

# 交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计

夏果, 吴骥, 黄禅, 胡明勇, 金施群

(合肥工业大学 光电技术研究院 特种显示技术教育部重点实验室; 特种显示技术国家工程实验室, 合肥 230009)

**摘 要:**根据 Czerny-Turner 结构光谱仪工作原理, 以便携式微型光学系统为设计目标, 设计了一种光谱范围为 200~900 nm 的交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统. 通过分辨率、光谱范围等设计要求确定光谱仪大致结构后, 引入初级像差对初始结构进行进一步优化. 首次提出将球差约束条件与光阑面选取相结合, 设计流程确定准直镜通光口径、光栅初始尺寸及聚焦镜中心波长对应口径, 继而结合彗差约束条件, 确定球面镜离轴角, 并基于几何光学确定聚焦镜初始通光口径的方法. 利用 ZEMAX 软件对初始参量进行模拟优化, 并采用自主研发的样机进行光谱测量, 分析结果表明, 该光学系统能够在狭缝宽度为 25  $\mu\text{m}$ , 光栅常数为 1.667  $\mu\text{m}/\text{line}$  条件下, 实现中心波长分辨率优于 1 nm, 边缘波长分辨率优于 1.5 nm.

**关键词:**几何光学; 像差理论; 光学设计; Czerny-Turner 结构; 微型光谱仪; 光栅; 分辨率

中图分类号: TH744.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0422003-8

## Design of Crossed-asymmetric Czerny-Turner Spectrometer Optical System

XIA Guo, WU Su, HUANG Chan, HU Ming-yong, JIN Shi-qun

(Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** According to the working principle of Czerny-Turner structure spectrometer, to make the system miniature and portable as specific design objectives, a crossed-asymmetric Czerny-Turner spectrometer with spectral range of 200 nm~900 nm was designed. Based on the spectrometer resolution and spectral range, we could determine the general structure. Then the primary aberration was used to optimize the initial structure, first proposed combining the spherical aberration constraints and aperture surface selection and designed process to determine the collimating mirror aperture, initial grating size and focusing lens aperture of the center wavelength, and then combined with the constraints of coma to calculate the spherical mirror off-axis angle, and based on geometric optics to determine the initial focus lens aperture. The imaging simulation, analysis and optimization for optical system were carried out with optical design program ZEMAX. The spectrum of mercury-argon light and the spectrum of halogen light are measured by our self-developed spectrometer. The results of analysis demonstrated that the optical system achieved central wavelength resolution less than 1 nm, edge wavelength resolution less than 1.5 nm, in conditions of the slit width is 25  $\mu\text{m}$ , the groove spacing is 1.667  $\mu\text{m}/\text{line}$ .

**Key words:** Geometrical optics; Aberration theory; Optical design; Czerny-Turner structure; Microspectrometer; Grating; Resolution

**OCIS Codes:** 220.4830; 300.6190; 080.1010; 080.2740

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ220749)和中央高校基本科研业务费专项资金(No. JZ2016HGBZ0754)资助  
第一作者: 夏果(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光谱仪器设计及应用. Email: gxia@zju.edu.cn  
收稿日期: 2016-11-21; 录用日期: 2017-02-09

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

## 0 引言

传统的光谱仪主要由光源和照明系统、准直系统、色散系统、成像和检测系统构成,被广泛应用于颜色测量、气体成分分析、农业医学、食品安全等领域.但传统的光谱仪器以大中型实验室仪器为主,存在体积大、价格高昂等缺点.随着科技的发展和市场需求,便携式微型化成为光谱仪发展的重要趋势.

微型光谱仪具有多种光学系统结构. Ebert-Fastie 系统是以一个大的凹面反射镜兼作准直和成像镜,该系统的优点是结构简单,广泛应用于单色仪中<sup>[1]</sup>. Offner 系统是一种同心光学系统,它的准直镜、聚焦镜和凸面光栅形成同心结构,优点是结构紧凑简单、像差小、相对孔径大等<sup>[2]</sup>. Czerny-Turner 系统是由 Ebert-Fastie 演变而来的,采用两面曲率中心重合的球面反射镜分别作为准直镜和反射镜,用一块平面衍射光栅作为色散元件,采用这种结构可以避免二次或多次衍射,其中 Czerny-Turner 光路采用的是 M 型结构和交叉型结构,相比于 M 型结构,交叉型结构的空间利用率更高,更为紧凑<sup>[3-7]</sup>. 近年来,国内外研究人员对 Czerny-Turner 光谱仪光学系统开展了大量的研究工作,陈芳等<sup>[8]</sup>针对球面镜作为准直镜和聚焦镜时消像散引起的干涉现象设计了既满足消像散条件又不产生干涉的 Czerny-Turner 光谱仪结构. Chrystal 等<sup>[9]</sup>对 Czerny-Turner 系统的杂散光做了简单校正. 陈谭轩等<sup>[10]</sup>研究了宽光谱 Czerny-Turner 光谱仪中的彗差和分辨率,分析了在测量光谱范围内彗差和分辨率的变化情况. 严羚玮<sup>[11]</sup>提出了一种采用柱面镜消除宽波段像散的方法. Austin 等<sup>[12]</sup>以在宽波段消像散为设计目标设计了一款 Czerny-Turner 光栅光谱仪. 彭雪峰等<sup>[13]</sup>设计了一款高分辨率的 Czerny-Turner 光谱仪系统,该系统在 350~450 nm 的光谱范围内能够分辨 0.1 nm 的波长,并且很好地消除了像差的影响. 徐力等<sup>[14]</sup>提出了一种采用自由曲面反射镜作为准直镜和成像镜的消像散 Czerny-Turner 光谱仪系统.

本文基于几何光学和像差理论分析,设计了一种光谱范围为 200~900 nm 的交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统. 在设计光谱仪系统时该系统选取焦距不同的准直镜和聚焦镜,构成非对称结构. 通过分辨率、光谱范围等设计要求确定光谱仪大致结构后,引入初级像差对初始结构进行进一步优化. 首次提出将球差约束条件与光阑面选取相结合,设计流程确定准直镜通光口径、光栅初始尺寸及聚焦镜中心波长对应口径,继而结合彗差约束条件,确定球面镜离轴角,并基于几何光学确定聚焦镜初始通光口径的方法. 将初始参量利用 ZEMAX 软件进行模拟优化,达到光谱范围分辨率的设计要求.

## 1 Czerny-Turner 光谱仪光学系统

图 1 为交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统. 光线从狭缝入射到准直镜  $M_1$ , 准直后的平行光经过光栅  $G$  分光作用后的衍射光入射到聚焦镜  $M_2$ , 经过聚焦镜聚焦在探测器 CCD 上. 图 1 中  $i$  为光栅入射角,  $\theta$  为光栅衍射角,  $\Phi$  为入射光线和衍射光线夹角,  $f_1$  为准直镜焦距,  $f_2$  为聚焦镜焦距,  $l$  为探测器宽度,  $a$  为狭缝宽度,  $\varphi_1$  为准直镜的离轴角,  $\varphi_2$  为聚焦镜的离轴角  $\varphi$  为像面倾角.

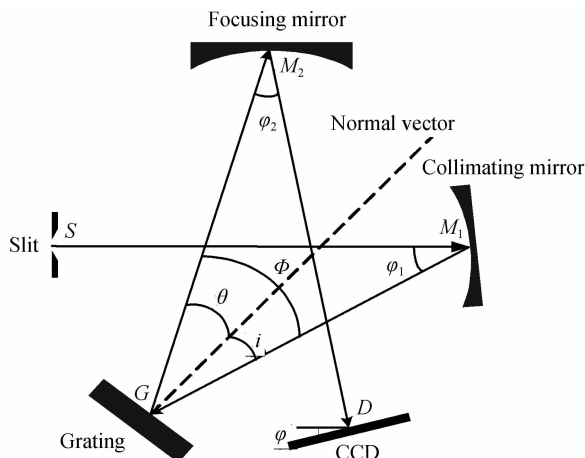


图 1 交叉非对称型 Czerny-Turner 系统光路图

Fig. 1 Layout of Crossed-asymmetric Czerny-Turner system

## 2 光学结构初始参量的计算

在光谱仪的光路结构中,各个元件参量之间通过几何光学和像差理论相互约束,因此不能独立地设置各个元件的初始参量,而需要通过它们之间的关系按流程依次设计.本文设计的光学系统初始参量的设计思路如图 2 所示.

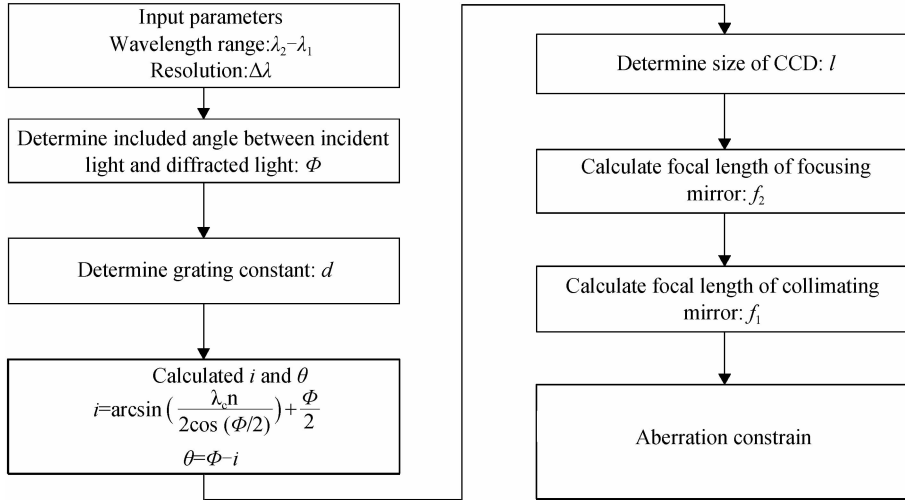


图 2 初始参量设计流程图

Fig. 2 Flowchart of determining initial parameters

光栅是光谱仪系统的核心器件,一般平面光栅的能量集中零级,无色散,这是因为普通平面光栅单缝衍射零级主极大的方向等于多缝干涉零级主极大的方向.因此需要将大部分的能量集中到所需要的光谱级次上,所以选取平面反射闪耀光栅.设计的光谱仪的测量范围为 200~900 nm,选用光栅线对数  $n$  为 600 line/mm.如图 1 入射角  $i$  和衍射角  $\theta$  夹角为  $\Phi$  取  $30^\circ$ ,满足

$$i + \theta = \Phi \quad (1)$$

衍射光线和入射光线在光线法线的两端,光栅方程为

$$d(\sin i - \sin \theta) = m\lambda \quad (2)$$

式中  $d$  为光栅常数,有  $d = 1/n$ ,  $m$  为光谱级次,本文中取  $m = 1$ .联立式(1)和式(2)得

$$i = \arcsin \left( \frac{\lambda_c n}{2 \cos \frac{\Phi}{2}} + \frac{\Phi}{2} \right) \quad (3)$$

式中  $\lambda_c$  为中心波长,代入数据得  $i = 24.8^\circ$ ,  $\theta = 5.2^\circ$ .在闪耀光栅中副闪耀波长  $\lambda_b$  与波长范围有关

$$\lambda_b = \lambda_1 + \frac{1}{4}(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (4)$$

式中  $\lambda_1$  为起始波长,  $\lambda_2$  为终止波长,求得  $\lambda_b = 375$  nm,将  $\lambda_b$  代入光栅方程可以求得闪耀方向  $\theta_b = 11.2^\circ$ .闪耀方向  $\theta_b$ ,闪耀角  $\alpha$ ,入射角  $i$  的关系为

$$\alpha = \frac{1}{2}(i - \theta_b) \quad (5)$$

求得闪耀角  $\alpha = 6.8^\circ$ ,闪耀角和主闪耀波长  $\lambda_B$  的关系为

$$2d \sin \alpha = m\lambda_B \quad (6)$$

代入数据求得  $\lambda_B = 394.7$  nm.

光谱仪中线色散率  $dl/d\lambda$  和分辨率  $\Delta\lambda$  是判断系统分辨能力的重要指标,线色散率表示两条波长差为  $d\lambda$  的谱线在像面上分开的距离为  $dL$ .分辨率是设计的光学系统所能分辨的两条最接近的波长差值.在光谱仪系统中线色散率公式为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta'} \frac{f_2}{\cos \varphi} \quad (7)$$

式中  $f_2$  为聚焦镜焦距,  $\varphi$  为像面倾角, 初始值设为  $0^\circ$ . 式(7)在波长  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  范围进行积分得到

$$f_2 = \frac{l \cos \theta}{n(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (8)$$

式中  $l$  为 CCD 有效长度, 选取的紫外增强 CCD 有效尺寸为 29.1 mm. 代入数据求得  $f_2 = 69$  mm, 光谱仪的分辨率计算公式为

$$\Delta\lambda = \frac{ad}{mf_1} \quad (9)$$

式中  $a$  为狭缝宽度, 设计中取  $25 \mu\text{m}$ ,  $f_1$  为准直镜焦距. 设计要求  $\Delta\lambda = 1$  nm, 将其代入式(9)求得准直镜焦距  $f_1 = 41.6$  mm, 取  $f_1 = 42$  mm.

Joseph Reader<sup>[15]</sup> 提出, 在 Czerny-Turner 光路结构中, 要使光谱仪系统初级彗差消除为零, 需要满足

$$\frac{\sin(\varphi_2/2)}{\sin(\varphi_1/2)} = \frac{R_2^2 \cos^3(\varphi_2/2) \cos^3 i}{R_1^2 \cos^3(\varphi_1/2) \cos^3 \theta} \quad (10)$$

式中  $R_1, R_2$  分别为准直镜和聚焦镜的曲率半径. 为消除彗差影响, 同时考虑到结构因素, 为使结构紧凑, 我们取  $\varphi_1 = 14^\circ, \varphi_2 = 24.6^\circ$ . 如图 1 所示, 有

$$SM_1 = f_1 \cos(\varphi_1/2) \quad (11)$$

得  $SM_1 = 41$  mm, 设计中需要让狭缝和光栅尽可能接近, 综合考虑取  $M_1G = GM_2 = 45$  mm, 其中  $GM_2$  就是光栅到聚焦镜距离.

用球面镜作为物镜时需要控制其球差在允许范围之内, 避免对像质产生过大影响. 可以通过控制球面镜焦距和口径的关系使球差产生的波像差满足瑞利准则从而约束球差. 式(12)即为球面镜球差约束公式.

$$D \leq 256\lambda(F/\#)^3 \quad (12)$$

设计中先选择合适的物方  $F$  数  $(F/\#)_1$ , 通过  $(F/\#)_1$  得到准直镜口径  $D_1$ , 代入式(12)判断, 当不能满足消球差条件时则需重新选取  $(F/\#)_1$ , 通过准直镜、光栅、聚焦镜之间的几何光学关系及球差约束来确定各光学元件的特征参量. 具体设计流程如图 3 所示.

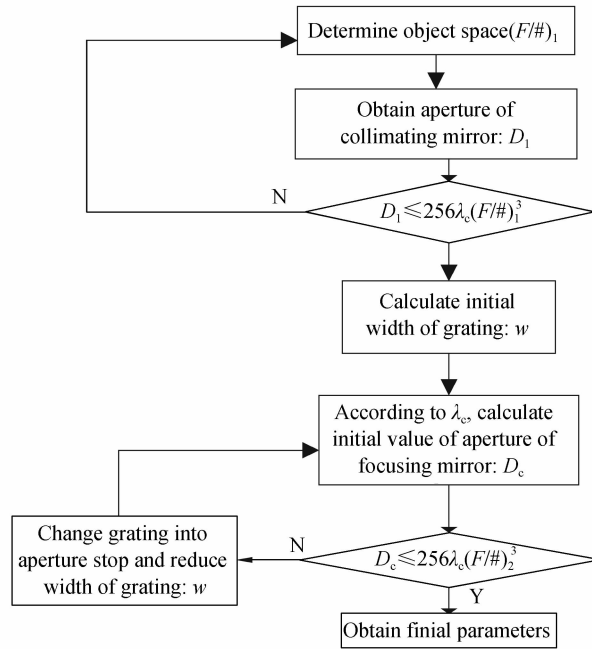


图 3 光学元件初始参量和优化流程图

Fig. 3 Flowchart of initial parameters determination and optimization for optical elements

光谱仪中光线在准直镜之间光栅的光路如图 4 所示. 设计中选取的  $(F/\#)_1$  为 5, 准直镜口径  $D_1 = f_1/(F/\#)_1$  计算得  $D_1$  为 8.4 mm, 满足式(12). 将准直镜设为光阑, 当从准直镜发出的光线恰好能完全被光栅接收时, 此时光栅的宽度为最小值  $W_0$ , 由图 4 中几何关系得到

$$D'_1 = D_1 \cos\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \quad (13)$$

$$W_0 = \frac{D_1'}{\cos i} \quad (14)$$

综上可得光栅初始宽度  $W_0$  为 9.2 mm.

光栅和聚焦镜之间的光路如图 5 所示,图中  $\theta_m$  为起始波长对应的衍射角,  $\theta_c$  为中心波长对应的衍射角,  $\theta_M$  为终止波长对应的衍射角. 衍射光线中心波长  $\lambda_c$  对应的聚焦镜口径为  $D_c$ , 满足

$$D_c = \frac{W_0 \cos \theta_c}{\cos (\varphi_2/2)} \quad (15)$$

计算可得中心波长  $\lambda_c$  对应聚焦镜口径  $D_c$  为 9.4 mm, 代入式(12)满足要求, 即设计的初始值可以满足消球差条件. 在实际光谱仪中光栅的尺寸只要大于  $W_0$  即可, 取  $W=12.7$  mm.

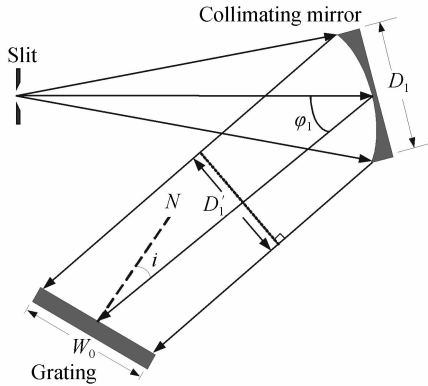


图 4 准直镜和光栅间的光路结构  
Fig. 4 Relative geometries of collimating mirror and grating in tangential view

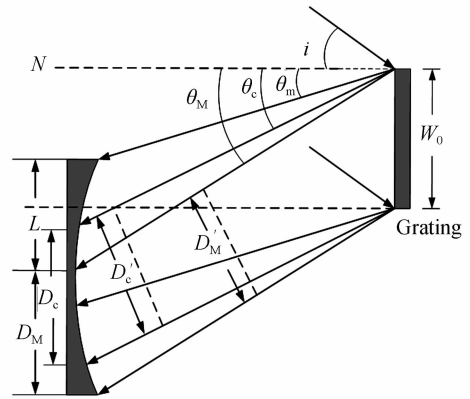


图 5 光栅和聚焦镜间的光路结构  
Fig. 5 Relative geometries of grating and focusing mirror in tangential view

聚焦镜的口径还需要考虑边缘波长的衍射光线, 因此实际口径值比中心波长对应的口径值要大, 如图 4 当光栅边缘发出的衍射光线都能恰好入射到聚焦镜上, 此时聚焦镜口径为最小值  $D$ , 从图 5 可以看出

$$D = D_M + L \quad (16)$$

式中

$$L = GM_2 \tan (\theta_M - \theta_m) \quad (17)$$

$$D_M = W_0 \frac{\cos \theta_M}{\cos (\varphi_2/2)} \quad (18)$$

式中  $GM_2$  为光栅到聚焦镜的距离,  $W_0$  为光栅初始宽度, 所以准直镜口径为

$$D_2 \geq D = GM_2 \tan (\theta_M - \theta_m) + W_0 \frac{\cos \theta_M}{\cos (\varphi_2/2)} \quad (19)$$

代入数据得  $D_2 \geq 29.67$  mm, 取  $D_2 = 31$  mm.

将聚焦镜到 CCD 的初始距离设为聚焦镜焦距, 像面倾角设为  $0^\circ$ , 至此整个光学系统的光学元件参量已经确定, 如表 1 所示, 整个系统的初始结构参量也得到确定, 如表 2 所示.

表 1 光学元件参量

Table 1 Parameters of optical elements		
Optical elements	Parameters	Value
Slit	$a$	25 $\mu\text{m}$
	$f_1$	42 mm
Collimating mirror	$D_1$	8.4 mm
	$f_2$	69 mm
Focusing mirror	$D_2$	31 mm
	$n$	600 l/mm
Blazing grating	$\alpha$	6.8°
	$\lambda_B$	394.7 nm
	$W$	12.7 mm

表 2 优化前的光学系统初始结构参量

Table 2 Parameters of the optical structure before optimization			
Parameters	Value	Parameters	Value
$i$	24.8°	$\varphi$	0°
$\theta$	5.2°	$SM_1$	41 mm
$\Phi$	30°	$M_1G$	45 mm
$\varphi_1$	14°	$GM_2$	45 mm
$\varphi_2$	24.6°	$M_2D$	69 mm

### 3 模拟优化与分析

在完成整个系统的初始参量计算后,我们将这些初始参量导入光学设计软件 ZEMAX 中模拟和优化分析,由于宽波段范围内存在像散和场曲等像差,实际上理想像面并非位于聚焦镜焦距处,像面倾角  $\varphi$  值也不为  $0^\circ$ ,需要优化像面的位置和倾角使其衍射光线能够在像面上聚焦.因此将聚焦镜距像面的距离和像面倾角设为变量进行优化.优化后的系统光路图如图 6 所示,可以看出优化后的各个波长的焦点近似在同一个焦平面上,该焦平面即为优化后的最佳像面,聚焦镜和像面之间的距离为 67.375mm,像面倾角  $\varphi$  为  $0.276^\circ$ ,优化后的光学系统参量如表 3 所示.

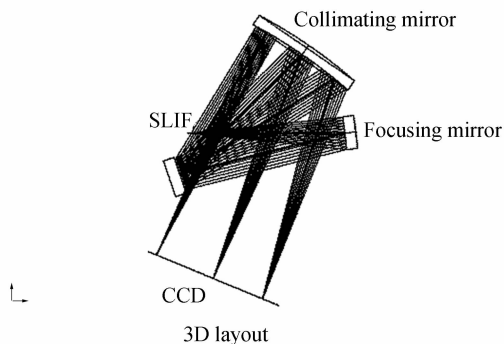


图 6 优化后光路图

Fig. 6 Optimized layout of the Crossed-asymmetric Czerny-Turner spectrometer

图 7 为通过光学设计软件 ZEMAX 得到的 200 nm, 201.5 nm, 550 nm, 551 nm, 898.5 nm, 900 nm 波长点列图.由图 7 可以看出谱线均可以清晰地分开,特别是中心波长 550 nm 处球差和彗差得到很好的校正.图 8 是整个工作波段(200~900 nm)光谱点列图在 Y 轴均方根半径,其中 200~250 nm 波段的 Y 轴均方根半径小于  $12 \mu\text{m}$ ,250~900 nm 波段的 Y 轴均方根半径小于  $10 \mu\text{m}$ .由以上分析表明所设计的光学结构能满足中心波长分辨率优于 1 nm,边缘波长分辨率优于 1.5 nm 的要求,在工作波段内获得了良好的成像质量.

通过上述设计方法自主研发了一款交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪样机.研制的 Czerny-Turner 光谱仪样机的外部结构如图 9 所示.利用研

表 3 优化后的光学系统结构参量  
Table 3 Parameters of the optical structure after optimization

Parameters	Value	Parameters	Value
$i$	$24.8^\circ$	$\varphi$	$0.276^\circ$
$\theta$	$5.2^\circ$	$SM_1$	41 mm
$\Phi$	$30^\circ$	$M_1G$	45 mm
$\varphi_1$	$14^\circ$	$GM_2$	45 mm
$\varphi_2$	$24.6^\circ$	$M_2D$	67.375 mm

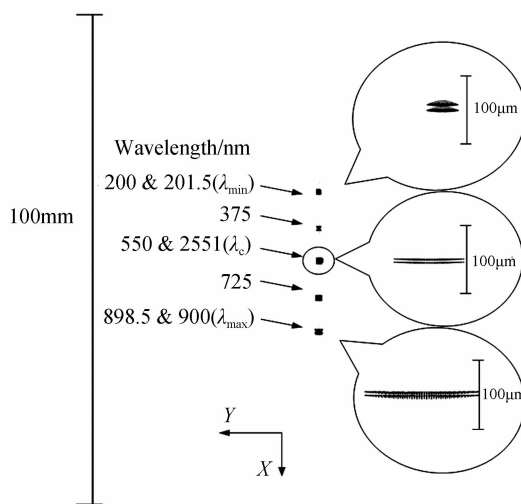


图 7 像面点列图

Fig. 7 Spot diagrams of image plane

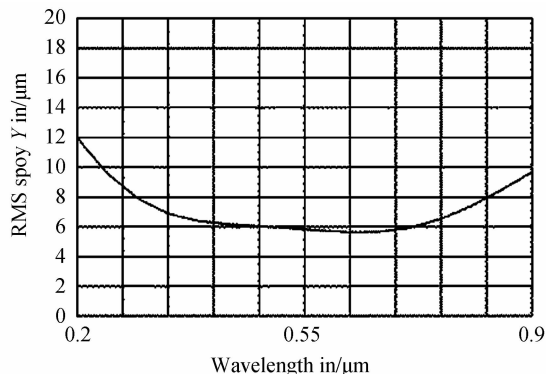


图 8 Y 轴方向点列均方根半径

Fig. 8 RMS spot Y versus wavelength



图 9 光谱仪样机

Fig. 9 Prototype of spectrometer

制的 Czerny-Turner 光谱仪样机测量汞氩灯(Ocean Optics, HG-1 型号)光谱,其中 350~850 nm 光谱曲线如图 10 所示.由瑞利判据可以看出,研制的 Czerny-Turner 光谱仪样机可以清晰分离 404.656 nm 和 407.783 nm,576.960 nm 和 579.066 nm、750.387 nm 和 751.465 nm 三对双峰谱线,满足全波段中心波长分辨率优于 1 nm,边缘波长分辨率优于 1.5 nm 的设计要求.图 11 为卤素灯(Ocean Optics, LS\_1 型号)在积分时间为 4ms 的光谱图,横坐标为波长,纵坐标为相对光谱强度.从图 11 可以看出 Czerny-Turner 光谱仪样机在 4 ms 的积分时间内能够得到较高的光谱相对响应强度.

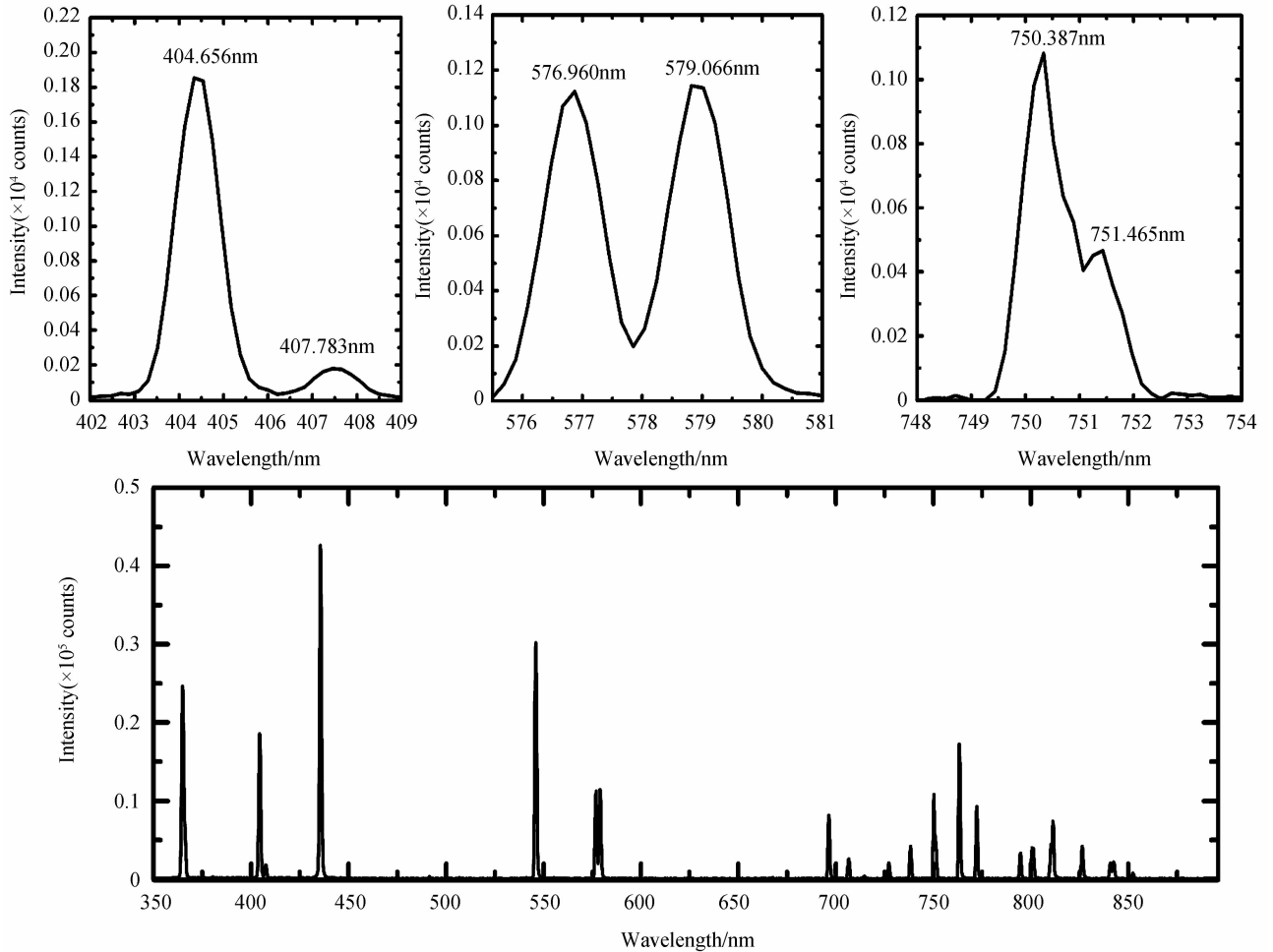


图 10 汞氩灯光谱图

Fig. 10 Spectrum of mercury-argon light

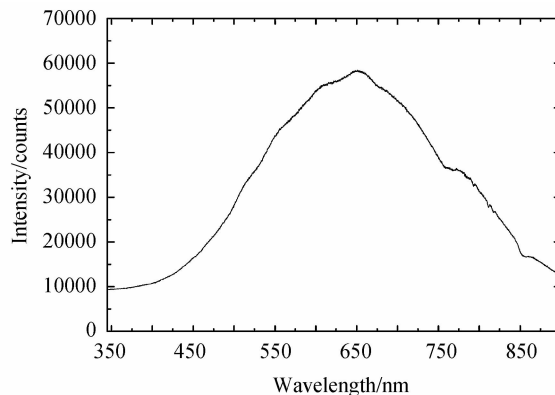


图 11 卤素灯光谱图

Fig. 11 Spectrum of halogen light

## 4 结论

本文基于几何光学与像差理论分析,提出了一套完整的交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计流程,详细地阐述了光学设计步骤并计算出各光学元件的特征参量和系统结构参量并运用光学设计软件 ZEMAX 进行模拟优化和成像分析.分析结果表明,该光学系统能够在狭缝宽度  $25\ \mu\text{m}$ ,光栅常数为  $1.667\ \mu\text{m}/\text{line}$ 条件下,实现中心波长分辨率优于  $1\ \text{nm}$ ,边缘波长分辨率优于  $1.5\ \text{nm}$ .使用自主研制的 Czerny-Turner 光谱仪样机测量了汞氙灯和卤素灯的光谱图.根据图像分析可知,Czerny-Turner 光谱仪样机能够在测量范围内达到全波段分辨率优于  $1.5\ \text{nm}$ 的效果.整个光学系统具有结构紧凑、体积小、分辨率高等优点.然而,本文没有涉及 Czerny-Turner 光谱仪杂散光校正分析和宽波段的像差校正分析,这也是下一步工作的研究方向.

## 参考文献

- [1] SMITH A. Ebert-Fastie spectral response measurements and simulation[D]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2014.
- [2] LIU Yu-juan, CUI Ji-chen, Banyanheshig, *et al.* Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(1): 52-57.  
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.
- [3] LIU Yi-xuan, YAN Chang-xiang, LI Xian-feng, *et al.* Design of spectrometer in color measuring spectrophotomete [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 1965-1971.  
刘怡轩, 颜昌翔, 李先锋, 等. 分光测色仪中的光谱仪系统[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(7): 1965-1971.
- [4] TANG Yi, ZHENG Cheng, JIA Hui-ping, *et al.* Theoretical and experimental study on anamorphosis correction of Czerny-Turner imaging spectrometers[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(9): 2507-2513.
- [5] XUE Qing-sheng. Astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer for broadband spectral simultaneity[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(10): 1338-1344.
- [6] FUTAMATA M, TAKENOUCI T, KATAKURA K. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(41): 4655-4665.
- [7] JIA Hui, YAO Yong. Characteristics of typical optical systems with diffractive gratings of micro-spectrometers and improvement of spectrometer's resolution[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2007, **27**(8): 1653-1658.  
贾辉, 姚勇. 微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨率的提高[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27**(8): 1653-1658.
- [8] CHEN Fang, XU Peng-hai. Optical structure optimization of broadband astigmatism-free Czerny-Tuner spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1265-1271.  
陈芳, 徐鹏海. 满足消像散条件的 Czerny-Turner 光谱仪光路的防干涉设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(6): 1265-1271.
- [9] CHRYSTAL C, BURRELL K H, PABLANT N A. Straightforward correction for the astigmatism of a Czerny-Turner spectrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(2): 425-429.
- [10] CHEN Tan-xuan, YANG Huai-dong, CHEN Ke-xin, *et al.* Coma and resolution in wide spectral region czerny - turner spectrometer[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1692-1696.  
陈谭轩, 杨怀栋, 陈科新, 等. 宽光谱 Czerny-Turner 光谱仪中的彗差与分辨率[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(6): 1692-1696.
- [11] YAN Ling-wei. Study on the advanced Czerny-Turner imaging spectrometer with high resolution in broadband[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2015, **35**(6): 1756-1760.  
严玲玮. 宽波段高分辨率改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(6): 1756-1760.
- [12] AUSTIN D R, WITTING T, WALMSLEY I A. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(19): 3846-3853.
- [13] PENG Xue-feng, WEI Kai-hua, LIU Yan-ping, *et al.* Optical system design of Czerny-Turner spectrometer with high resolution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1022003.  
彭雪峰, 魏凯华, 刘艳萍, 等. 高分辨率 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2014, **43**(10): 1022003.
- [14] XU Li, CHEN Ke-xin, HE Qing-sheng, *et al.* Design of freeform mirrors in Czerny-Turner spectrometers to suppress astigmatism[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(15): 2871-2879.
- [15] Joseph Reader. Optimizing Czerny-Turner spectrographs: a comparison between analytic theory and ray tracing[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, **59**(9): 1189-1194.