

doi:10.3788/gzxb20144310.1022003

高分辨率 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计

彭雪峰¹, 魏凯华², 刘艳萍³, 黄文华³, 吴平辉^{3,4}

(1 宁波大学 科学技术学院, 浙江 宁波 315212)

(2 杭州电子科技大学 生命信息与仪器工程学院, 杭州 310018)

(3 湖州师范学院 理学院 物理系, 浙江 湖州 313000)

(4 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要:为了克服光栅光谱仪分辨率低、像差较大、体积大的缺点,根据光谱仪工作原理和几何光学像差理论,设计了一种光谱范围为 350~450 nm 的 Czerny-Turner 光谱仪光学系统. 计算了光学系统各光学元件的特征参量和系统结构参量. 运用光学设计软件 Zemax 对系统进行光线追迹与优化设计,并对设计结果进行分析. 理论和实验结果均表明,该系统在 350~450 nm 光谱范围内分辨率小于 0.1 nm,系统体积约为 105×105×20 mm³,整个光学系统具有结构简单、体积小、分辨率高、稳定性好等优点.

关键词:光学系统; 光学设计; 光栅; 光谱仪; Zemax; 像差; 分辨率

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1022003-5

Optical System Design of Czerny-Turner Spectrometer with High Resolution

PENG Xue-feng¹, WEI Kai-hua², LIU Yan-ping³, HUANG Wen-hua³, WU Ping-hui^{3,4}

(1 College of Science & Technology, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315212, China)

(2 College of Life Information Science & Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(3 Department of Physics, School of Science, Huzhou University, Huzhou 313000, China)

(4 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: To overcome the problems of the present grating spectrometer, such as low resolution, large aberration, and large size, a kind of Czerny-Turner spectrometer optical system whose effective wavelength range is from 350 nm to 450 nm was designed based on the working principle spectrometers and the aberration theory. Parameters of the optical elements and structure were calculated. The ray tracing, simulation and optimization for the optical system were carried out with optical design Zemax software. The theoretical and experimental results demonstrate that the optical system can operate in 350~450 nm waveband with resolution less than 0.1 nm. The optical system size was 105mm×105 mm×20 mm, it is characterized by simple structure, small size, high spectral resolution, and good stability.

Key words: Optical systems; Optical design; Optical gratings; Spectrometer; Zemax; Aberrations; Resolution

OCIS Codes: 220.0220; 120.6200; 300.6320; 050.1950

0 引言

光谱仪是一种利用光谱技术原理对物质结构和成

分进行观察、分析和处理的重要检测设备. 按照其分光方式不同可分为棱镜色散型、干涉型、滤光片型、光栅色散型和计算层析型. 其中,光栅色散型光谱仪由于具

基金项目:国家自然科学基金(No. 11272120)、浙江省教育厅科研项目(No. Y201430465)、宁波大学校科研基金(No. XYL13001)和浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(No. 2012R425005)资助

第一作者:彭雪峰(1983-),男,讲师,硕士,主要研究方向为光电技术. Email: pengxuefeng@nbu.edu.cn

通讯作者:吴平辉(1983-),男,博士,主要研究方向为光学设计与光电技术. Email: wph1021@163.com

收稿日期:2014-03-17; **录用日期:**2014-05-20

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

有原理简单、性能稳定、色散均匀、光谱分辨率高、谱线弯曲小、色畸变小等优点而受到研究者的广泛关注. 近年来,国内外的研究人员对光谱仪的设计和性能进行了大量的研究工作,如文献[1-2]采用在探测器前增加柱面透镜用于消除离轴像散. 文献[3]利用球面镜实现了一种宽带的成像光谱仪. 文献[4]研制了一台光谱范围为 300~800 nm,中心波长分辨率为 1 nm、边缘波长为 2 nm 的双光束微型光谱仪. 文献[5]基于对称式 Czerny-Turner 型结构,提出使用两块平面光栅进行光谱分离的方法,通过对系统各像差进行校正与优化,从理论上设计了一种光谱分辨率优于 1 nm,光谱范围为 276~700 nm 的光谱仪光学系统. 但是,随着现代科学技术和前沿交叉学科的快速发展,已经对光谱仪的性能提出了更高的要求,主要表现在:应具有更高的分辨率,更小的体积,更高的灵敏度和更快的检测速度等. 然而,上述所设计的光谱仪大多还只是理论计算与优化,缺少充分的实验验证,而且光谱测量范围均超过 200 nm,分辨率一般大于 0.5 nm,无法满足某些特殊领域应用的需求,特别是航空航天^[6-7]、生物医学^[8]、国防军工等高准确度测量场合. 鉴于此,本文基于光谱仪工作原理和光学像差理论,设计了一种光谱范围为 350~450 nm,分辨率优于 0.1 nm 的 Czerny-Turner 光谱仪光学系统,运用光学设计软件 Zemax 对其进行分析与优化,并通过实验测量验证其性能.

1 光路结构参量的设计

1.1 Czerny-Turner 光路结构

目前的平面光栅光谱仪光路结构大多采用 Czerny-Turner 光路,即用两面凹面反射镜分别作为准直镜和聚焦镜,采用这种光路结构的优点是不仅可以避免二次或多次衍射,而且便于光学元件的加工与调装^[9-10]. Czerny-Turner 光路结构又分为交叉型和 M 型两种光路,其中交叉型光路结构更紧凑,空间利用率高,但其在光谱测量范围内的彗差和分辨率稳定性较差^[11]. 因此本文所设计的光谱仪光路采用 M 型 Czerny-Turner 光路结构,如图 1. 入射光线由狭缝 S 入射,经准直镜 M_1 准直后射入平面衍射光栅 G,衍射光线通过聚焦镜 M_2 成像于 CCD 探测器上. 图中 O 为两

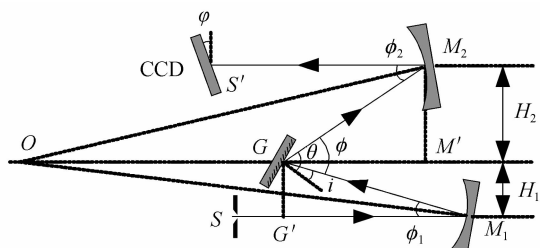


图 1 Czerny-Turner 型光路结构

Fig. 1 Schematic of Czerny-Turner structure

面反射镜的曲率中心, i 为光线在光栅上的入射角, θ 为中心波长的衍射角, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为光线在准直镜和聚焦镜上的离轴角, φ 为像面倾斜角度,其他物理参量如图 1.

1.2 系统结构参量计算

在 Czerny-Turner 光路结构中,由于准直镜和聚焦镜均在离轴条件下使用而产生一定的彗差. 彗差不仅打破了成像的对称性,使谱线单边扩散,降低系统的分辨率,影响成像质量,也容易产生假谱线,因此必须尽量消除彗差. Shafer 提出了消除彗差的方法^[12],即光路参量必须满足

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\sin(\phi_1/2)}{\sin(\phi_2/2)} = \left(\frac{\cos\theta}{\cos i}\right)^3 \quad (1)$$

式中 H_1 和 H_2 分别为准直镜和聚焦镜的离轴高度.

设计过程中,为了保证足够的入射光能量,综合考虑系统结构尺寸后取中间工作波长 400 nm 的入射光线和衍射光线夹角 $\phi = 32^\circ$. 由图 1 中的几何关系可得

$$i + \phi = \theta \quad (2)$$

$$\phi_1 + \phi_2 = \phi \quad (3)$$

光栅是整个光学系统的核心元件,其参量直接影响了光学系统的性能,光栅色散方程为

$$d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda \quad (4)$$

式中 $d = 1/n$ 为光栅常量, n 为光栅刻线密度,这里选取 $n = 1\,800$ line/mm 的平面衍射光栅, m 为衍射级次,取光栅衍射一级光谱,即 $m = 1$, λ 为波长. 联立式(1)~(4)可得 $\phi_1 = 11^\circ$, $\phi_2 = 21^\circ$, $i = 6^\circ$, $\theta = 38^\circ$.

光栅的闪耀波长满足^[13]

$$\lambda_b = \lambda_1 + \frac{1}{4}(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (5)$$

式中 λ_1, λ_2 分别为测量光谱范围的起始波长和终止波长,这样可得到副闪耀波长 $\lambda_b = 375$ nm. 将其代入式(4)求得闪耀方向 $\theta_b = 34.8^\circ$,又因为光栅闪耀角、入射角和闪耀方的关系为

$$\alpha = \frac{i + \theta_b}{2} \quad (6)$$

求得闪耀角 $\alpha = 20.4^\circ$. 由于主闪耀波长和闪耀角满足

$$\lambda_b = \frac{2\sin\alpha}{n} \quad (7)$$

所以最终求得主闪耀波长 $\lambda_b = 387.3$ nm.

光谱分辨率是反映光谱仪对所测量光谱的分辨能力的一个重要特征参量,常用光谱带宽(即谱线半高宽)来定义它. 准直镜和聚焦镜的焦距和孔径决定了系统的分辨率和球差. 准直镜的焦距与分辨率满足

$$\delta\lambda = \frac{a\cos i}{nf_1} \quad (8)$$

式中 a 为入射狭缝宽度, f_1 为准直镜的焦距.

图 2 给出了 $i = 6^\circ$, $n = 1\,800$ line/mm, 狭缝宽度分别为 5 μm , 10 μm , 20 μm 和 25 μm 时分辨率与准直镜

焦距的关系曲线图。由图可知,减小狭缝宽度或者增大准直镜焦距均可以提高光学系统的分辨率,这里选用狭缝宽度 $a=20\ \mu\text{m}$,当系统分辨率为 $0.1\ \text{nm}$ 时, $f_1=110.5\ \text{mm}$ 。

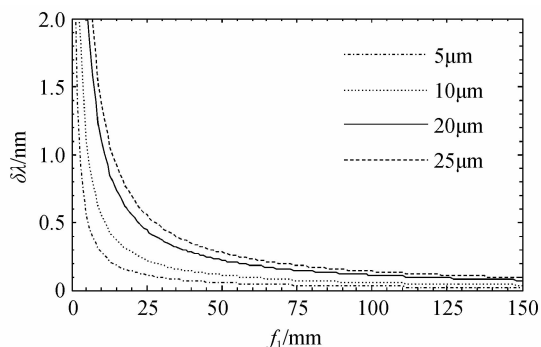


图2 分辨率和准直镜焦距关系

Fig. 2 The relationship between resolution and focal length of the collimating mirror

聚焦镜的焦距 f_2 应满足

$$f_2 = \frac{l \cos \theta \cos \varphi}{n(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (9)$$

式中 l 为 CCD 的有效长度,这里所选用的 CCD 封装长度为 $41.6\ \text{mm}$,有效长度 $l=28.6\ \text{mm}$ (SONY ILX511),在初始设计时,假设 $\varphi=0$,可求得 $f_2=125.2\ \text{mm}$ 。若考虑像面倾斜角度后,实际聚焦镜焦距 f_2 小于 $125.2\ \text{mm}$ 。此外,为了防止 CCD 被光栅所遮挡,结合考虑光栅宽度大致尺寸,聚焦镜的离轴高度应满足: $H_2 > 30\ \text{mm}$ 。综合考虑系统光路结构,最终选取 $f_1=f_2=100\ \text{mm}$ 。

在光谱仪光学系统的设计中,除了要考虑彗差对成像质量的影响,球差会对称性地扩展谱线宽度而降低系统分辨率,因此在使用凹球面反射镜作为准直镜时,应该将球差控制在像差容许的范围之内,即需应满足

$$f_1 \leq 256\lambda F^4 \quad (10)$$

式中 $F=f_1/D_1$ 为光谱仪的 F 数, D_1 为准直镜的孔径,所以由式(10)可求得 $D_1 \leq 17.9\ \text{mm}$,这里选取 $D_1=17\ \text{mm}$ 。聚焦镜的孔径应满足

$$D_2 \geq 2f_2 \tan(\theta_2 - \theta) / \cos(\phi_2/2) \quad (11)$$

式中 θ_2 为终止波长的衍射角,代入式(4)求得 $D_2 \geq 24.5\ \text{mm}$ 。计算中忽略了不同波长的光线从光栅到达聚焦镜的距离不同,而且考虑应让衍射光线被聚焦镜充分接收,最终选取 $D_2=36.5\ \text{mm}$ 。

光栅的宽度、入射角和准直镜孔径三者满足

$$W \geq \frac{D_1}{\cos i} \quad (12)$$

由式(12)可得 $W \geq 17.1\ \text{mm}$,考虑光路系统后选取刻划面积为 $20 \times 20\ \text{mm}^2$ 的平面衍射光栅。至此,整个光谱仪光路的各部分光学元件主要特征参量均已确定,如表1所示。

表1 光学元件特征参量

Table 1 Specification of the optical elements

Optical element	Parameters	Value
Collimating mirror	f_1	100 mm
	D_1	17 mm
Condensing mirror	f_2	100 mm
	D_2	36.5 mm
	n	1 800 line/mm
Planar grating	α	20.4°
	λ_B	387.3 nm
	W	20 mm

此外,图1中光学系统各物理参量的几何关系满足

$$SM_1 = M_1G = f_1 / \cos(\phi_1/2) \quad (13)$$

$$M_1G' = f_1 \cos \phi_1 / \cos(\phi_1/2) \quad (14)$$

$$GM' = f_2 \cos \phi_2 / \cos(\phi_2/2) \quad (15)$$

$$S'M_2 = M_2G = f_2 / \cos(\phi_2/2) \quad (16)$$

$$H_1 = 2f_1 \sin(\phi_1/2) \quad (17)$$

$$H_2 = 2f_2 \sin(\phi_2/2) \quad (18)$$

联立式(13)~(18),通过计算可获得整个光学系统的初始结构参量,如表2所示。

表2 优化前光学系统结构参量

Table 2 Parameters of the optical structure before optimization

Parameters	Value	Parameters	Value
i	6°	φ	0°
θ	38°	SM_1	100.5 mm
ϕ	32°	M_1G	100.5 mm
ϕ_1	11°	M_1G'	98.6 mm
ϕ_2	21°	GM'	95 mm
H_1	19.2 mm	$S'M_2$	101.7 mm
H_2	36.5 mm	M_2G	101.7 mm

2 系统模拟优化、实验测试与讨论

在完成对整个光学系统结构参量的初始设计后,利用光学设计软件 Zemax 对系统参量进行模拟分析并优化。首先对初始系统光路进行光线追迹,如图3。

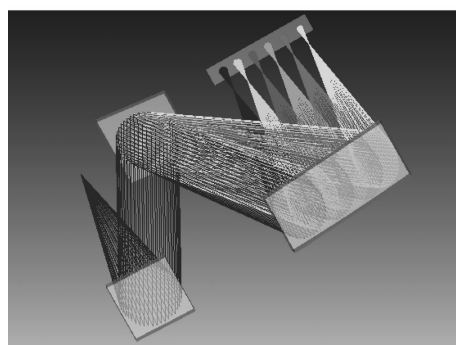


图3 优化前光路图

Fig. 3 The diagram before optimization

由图3可知,由于存在象散和场曲等像差,最佳像面并非处于像面倾角为零的平面(即 $\varphi=0$),应当适当

调节像面位置和像面倾斜角度. 因此, 将聚焦镜到像面距离和像面倾斜角度设为变量, 利用优化函数对其优化. 通过考察相距一定波长的两条谱线在像面上的点列图来分析系统的光谱分辨率. 图 4 是通过光学设计软件 Zemax 计算得到的 350 nm, 400 nm, 450 nm 处波长相距为 0.1 nm 的三组参考谱线的点列图. 由图可知, 任意一组中的两条谱线均可以清晰分开, 表明该光学系统的光谱分辨率优于 0.1 nm.

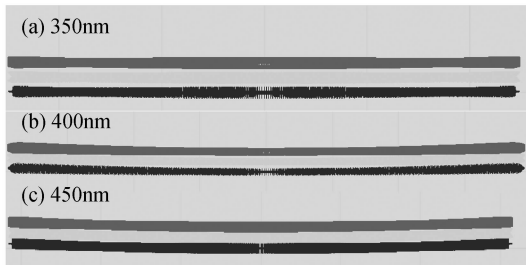


图 4 间隔为 0.1 nm 的三组波长点列图

Fig. 4 Spot diagram of three pairs of wavelength with an interval of 0.1 nm

图 5 给出利用软件计算获得的系统在 350 ~ 450 nm 的光谱范围内相距为 10 nm 的分辨率分布情况. 由图可知, 该系统在整个光谱范围内的分辨率稳定性较好, 在 350 ~ 420 nm 光谱范围内分辨率为 0.07 nm, 在大于 430 nm 光谱分辨率略有下降, 但是在设计的整个光谱范围内分辨率均小于 0.1 nm, 满足光谱分辨率的预期设计指标.

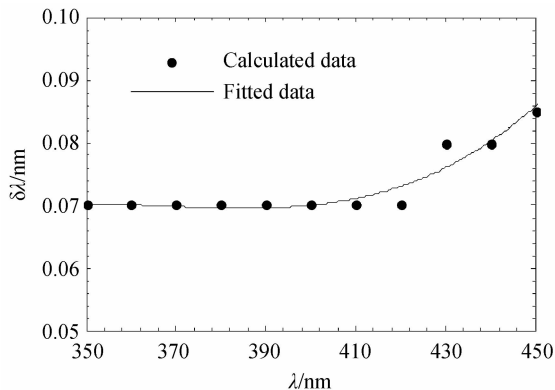


图 5 分辨率与波长关系

Fig. 5 The relationship between resolution and wavelength

优化后的聚焦镜到像面距离为 96.1 mm, 像面倾斜角度为 4.1° , 优化后的光学系统结构参量如表 3. 综合考虑光学元件的特征参量和系统的结构参量, 可知系统体积为 $105 \times 105 \times 20 \text{ mm}^3$, 该结构尺寸小于目前市场上同类型的产品, 例如荷兰 Avantes 公司研发的 Avaspec 系列小型光纤光谱仪.

表 3 优化后光学系统结构参量

Table 3 Parameters of the optical structure after optimization

Parameters	Value	Parameters	Value
i	6°	φ	4.1°
θ	38°	SM_1	100.5 mm
ϕ	32°	M_1G	100.5 mm
ϕ_1	11°	M_1G'	98.6 mm
ϕ_2	21°	GM'	95 mm
H_1	19.2 mm	$S'M_2$	96.1 mm
H_2	36.5 mm	M_2G	101.7 mm

依据上述理论设计, 定制各种光学元件并搭建实验光路对所设计的光谱仪光学系统进行性能测试. 实验中采用低压汞灯作为定标光源, 测试结果如图 6. 通过对其特征谱线分析可知, 该系统的实际光谱分辨率约为 0.1 nm, 比理论计算值稍大, 这是由于光学元件加工准确度、光学系统的像差、谱线轮廓的差异、光源的不稳定性和仪器调装等方面的误差所导致. 若选择更小的狭缝宽度或者更高刻线密度的光栅, 系统的光学分辨率还将进一步提高.

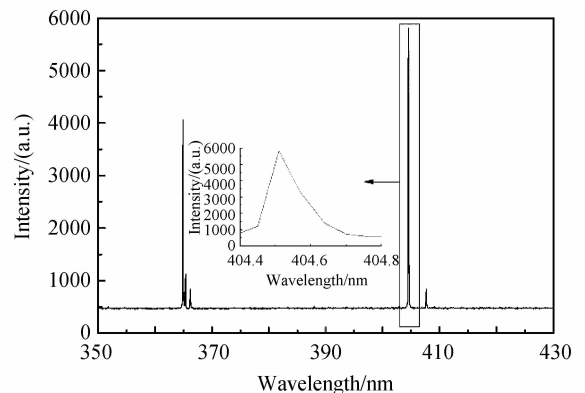


图 6 实验测量光谱曲线

Fig. 6 The experimental measurement spectrum curve

3 结论

本文基于光学像差设计理论, 通过对各光学元件特征参量和系统结构参量的计算, 设计了一种光谱范围为 350 ~ 450 nm 的 Czerny-Turner 光谱仪光学系统, 并运用光学设计软件 Zemax 对系统进行分析与评价. 搭建实验测试平台, 对光学系统的性能进行测试. 研究表明, 所设计的光学系统在 350 ~ 450 nm 光谱范围内分辨率优于 0.1 nm, 系统体积约为 $105 \times 105 \times 20 \text{ mm}^3$.

参考文献

- [1] LEE K S, THOMPSON K P, ROLLAND J P, *et al.* Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22): 23378-23384.

- [2] XIA Guo, QU Bi-xiang, LIU Peng, *et al.* Astigmatism-corrected miniature Czerny-Turner spectrometer with freeform cylindrical lens[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(8): 081201.
- [3] AUSTIN D R, WITTING T, WALMSLEY I A, *et al.* Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(19): 3846-3853.
- [4] LIU Kang, YU Fei-hong. Double-beam miniature spectrometer system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1218-1223.
刘康,余飞鸿.双光束微型光谱仪[J].光子学报,2013,**42**(10): 1218-1223.
- [5] XU Ming-ming, JIANG Qing-wu, LIU Wen-qing, *et al.* An improved method for optical system design and optimization of double grating spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(1): 184-189.
徐明明,江庆五,刘文清,等.一种新型双光栅光谱仪光学系统设计及优化[J].红外与激光工程,2014,**43**(1): 184-189.
- [6] YE Bi-qing, WANG Fei, SUI Cheng-hua, *et al.* Optical design of spectrum observation system in ZnO temperature sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(7): 0716001.
叶必卿,汪飞,隋成华,等.ZnO温度传感器光谱监测系统的设计[J].中国激光,2011,**38**(7): 0716001.
- [7] SUI Cheng-hua, XIA Juan, WANG He-lin, *et al.* Optical temperature sensor based on ZnO thin film's temperature-dependent optical properties [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, **82**(8): 084901.
- [8] WU Ping-hui, GU Ju-guan, LIU Bin, *et al.* Experimental research on wavelength modulation surface plasmon resonance sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 022501.
吴平辉,顾菊观,刘彬,等.波长检测型表面等离子体共振传感器的实验研究[J].激光与光电子学进展,2012,**49**(2): 022501.
- [9] DALTON M L. Astigmatism compensation in the Czerny - Turner spectrometer[J]. *Applied Optics*, 1966, **5**(7): 1121-1123.
- [10] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LU Feng-qin, *et al.* Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 35-40.
薛庆生,王淑荣,鲁凤芹.星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究[J].光学学报,2009,**29**(1): 35-40.
- [11] CHEN Tan-xuan, YANG Huai-dong, CHEN Ke-xin, *et al.* Coma and resolution in wide spectral region Czerny-Turner spectrometer [J]. *Spectroscopy and 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.
- [12] SHAFER A B, MEGILL L R, DROPPLEMAN L, *et al.* Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, **54**(7): 879-886.
- [13] 林中,范世福.光谱仪器学[M].北京:机械工业出版社,1989.