

平面光栅双单色仪的光学系统设计

寇婕婷^{1,2}, 巴音贺希格^{1*}, 唐玉国¹, 齐向东¹, 于宏柱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. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 平面光栅双单色仪是构成光栅衍射效率测试仪的重要组成部分, 为了完成光栅衍射效率测试仪的研制, 需要对平面光栅双单色仪的光学系统进行设计和模拟。仪器主要由光源、前置单色仪、测量单色仪和探测器组成; 结合仪器的实际使用需要, 确定了光源、探测器和光路结构, 根据仪器的设计要求, 分别对前置单色仪和测量单色仪的光学系统进行设计和模拟, 给出了各自光学系统的像面点列图和实际光线追迹数据。设计结果保证了仪器光学系统的测量准确性。

关键词 平面光栅; 双单色仪; 光学设计; 结果分析

中图分类号: TH741.4 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)03-0830-04

引言

平面光栅双单色仪通常是将两个简单的平面光栅单色仪串联在一起, 使光谱线从第一个单色仪的出射狭缝射出后立即进入第二个单色仪的入射狭缝, 最后从第二个单色仪的出射狭缝输出所要求的单色光束, 这就构成了双单色仪^[1, 2]。采用双单色仪的目的主要是减小出射光束中的杂散光成分, 提高仪器的信噪比, 这对微弱光谱信号的检测极为重要^[3, 4], 在大气物理、环境科学、目标背景信息、气象学、高精度光谱辐射测量等方面有着重要应用^[5, 6]。平面光栅衍射效率测试仪是一类特殊的平面光栅双单色仪, 主要由光源、前置单色仪、测量单色仪和探测器组成, 前置单色仪为光栅相对衍射效率的测量提供单色光, 被测光栅或标准反射镜放置在测量单色仪中, 对于前置单色仪输出的某一特定波长, 探测器分别接收相同级次上来自被测光栅和标准反射镜的出射光通量, 两者相比即是被测光栅的相对衍射效率测量值^[7]。

因各行各业对高质量光栅的需求越来越迫切, 光栅的制造与检测技术发展水平逐渐成为人们高度关注的课题^[8, 9]。衍射效率是光栅的重要技术指标, 而双光栅单色仪是构成光栅衍射效率测试仪的核心组成部分, 其光学系统的设计和模拟是仪器研制不可缺少的关键步骤之一, 设计结果将对光栅衍射效率测试仪的安装和调试起到一定的指导作用^[10, 11]。

鉴于此, 本文从仪器的实际使用需要出发, 对双光栅单色仪的光学系统进行分析, 确定了光源、探测器、光路结构等, 结合仪器光学系统的设计要求, 分别对前置单色仪和测量单色仪进行设计和模拟, 给出了各自光学系统的像面点列图和实际光线追迹数据; 设计结果表明, 前置单色仪出射光斑的最大宽度为 0.33 mm, 最大高度为 1.83 mm; 测量单色仪出射光斑的最大宽度为 0.66 mm, 最大高度为 7.27 mm; 从而确定了双光栅单色仪系统的中间狭缝和出射狭缝的尺寸, 可以保证出射光斑全部进入探测器, 使出射光通量没有损失, 进而确保了仪器光学系统的测量准确性, 完成了对双光栅单色仪光学系统的设计和模拟。

1 光学系统分析

光栅衍射效率测试仪包括光源、前置单色仪、测量单色仪和探测器。根据测量光谱范围的要求, 光源选用氙灯和钨灯, 分别提供 200~400 nm 和 400~800 nm 的连续光谱, 可以相互切换; 光源和前置单色仪为测量提供单色光。探测器的选取首先要保证较高灵敏度, 同时对出射光斑分辨本领要求不高, 选择光电倍增管。

由双光栅单色仪构成的光学系统是光栅衍射效率测试仪的核心组成部分, 其光路结构示意图如图 1 所示。根据仪器整体组装的需要, 前置单色仪应该尽可能体积小、质量轻、

收稿日期: 2011-07-27, 修订日期: 2011-11-10

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAK03A02), 中国科学院重大科研装备研制项目(YZ200804), 吉林省科技发展计划项目(20070523, 20086013)和吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)资助

作者简介: 寇婕婷, 女, 1983 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: koujieting@163.com

* 通讯联系人 e-mail: bayin888@sina.com

便于安装和调试,因此,选用 Czerny-Turner 正交型光路结构,其入射光线与出射光线在空间路径上交叠,结构简单、紧凑,有利于消除杂散光,符合仪器的使用要求,并且,在其入射狭缝前安置滤光片,可以将二级以上的光谱滤掉,本仪器中只使用一级光谱,以保证入射光强度;测量单色仪选用 Czerny-Turner 全对称型光路结构,可以避免二次衍射或多次衍射,同时方便了准直镜和聚焦镜的加工和装调^[12]。

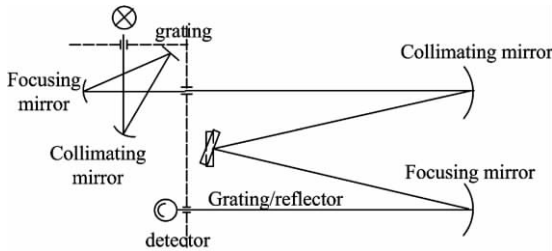


Fig 1 Optical structure of the instrument

由于双光栅单色仪测量的是光栅的相对衍射效率,从前置单色仪出射的准单色光进入测量单色仪后,分别经过被测光栅衍射和标准反射镜反射,由探测器分别接收衍射光通量和反射光通量,二者相比即可得到被测光栅的相对衍射效率测量值。因此,在对双光栅单色仪的光学系统进行设计和模拟时,只需保证两次测量的出射光通量能够全部由探测器接收,使出射光通量没有损失,不会带来测量误差即可,而对整个光学系统的分辨率和像差校正并没有特别要求。

为避免出射光通量损失,通常双光栅单色仪的中间狭缝和出射狭缝不应対光束有任何限制,因此,狭缝宽度的选择应该满足^[1, 13]

$$a_2 \geq a_1 \cdot \beta + b \quad (1)$$

其中, a_2 代表出射狭缝的宽度, a_1 代表入射狭缝的宽度, β 代表横向放大率, b 代表入射狭缝在出射狭缝上的像差宽度。在本仪器中,前置单色仪的出射狭缝即是测量单色仪的入射狭缝,即中间狭缝;根据式(1),并结合光学系统的设计结果,便可以确定中间狭缝和出射狭缝的尺寸。

2 设计过程与结果分析

考虑仪器的实际使用情况以及总体尺寸的限制,双光栅单色仪的光学系统应该满足以下的设计要求:工作光谱范围 200~800 nm,光谱带宽 2 nm,相对孔径: 0.25,前置单色仪体积 120 mm×120 mm×50 mm。

2.1 前置单色仪

根据仪器的设计要求和实际需要,前置单色仪采用结构简单紧凑的 Czerny-Turner 正交型光路结构。分光光栅是该系统的核心元件,根据工作光谱范围和光谱带宽的要求,分光光栅选用 1 200 线·mm⁻¹, 25 mm×25 mm、刻划面积 23 mm×23 mm 的平面光栅。由于系统体积的限制,考虑到相对孔径的要求,反射镜的焦距取为 100 mm,尺寸为 25 mm×25 mm,略比分光光栅大一些,以确保经光栅衍射的出射光线全部照射在其反射面上。入射狭缝的宽度应使出射光束所包含的光谱宽度尽可能满足设计要求的理论光谱宽度,以

保证出射光束的单色性;根据光栅线色散倒数公式,可以得出前置单色仪系统的光谱带宽和入射狭缝宽度之间的关系式为^[14, 15]

$$a_1 = \Delta\lambda \cdot \frac{m}{d \cos\theta} \cdot f \quad (2)$$

其中, m 代表光谱级次,本仪器中只取 +1 级; d 代表光栅常数; θ 代表光栅的衍射角; f 代表反射镜焦距。设计要求光谱带宽为 2 nm,根据式(2)进行计算,本系统选取入射狭缝宽度为 0.2 mm,同时,应尽可能增大入射狭缝的高度,以提高进入系统的光能量,因此,狭缝高度取为 5 mm。

在确定上述条件后,分别以 200, 500, 800 nm 为中心波长,±1 nm 为光谱带宽,取入射狭缝中心点(0,0)和四个边缘点(2.5 mm, 0.1 mm), (2.5 mm, -0.1 mm), (-2.5 mm, 0.1 mm), (-2.5 mm, -0.1 mm)为物面,对前置单色仪的光学系统进行光线追迹。光学系统的结构参数如表 1 所示;图 2 是中心波长为 500 nm 时光学系统的结构模拟图。

Table 1 Structure parameters of the optics system

Surface	Y radius	Thickness	Refract mode	Non-centered
Object	Infinity	60.00	Refract	
Stop	-120.00	-45.00	Reflect	Decenter & return
2	Infinity	0.00	Refract	Basic decenter
3	Infinity	0.00	Reflect	Decenter & return
4	Infinity	30.00	Refract	
5	-120.00	-52.50	Reflect	Basic decenter
Image	Infinity	-6.22	Refract	Decenter & return

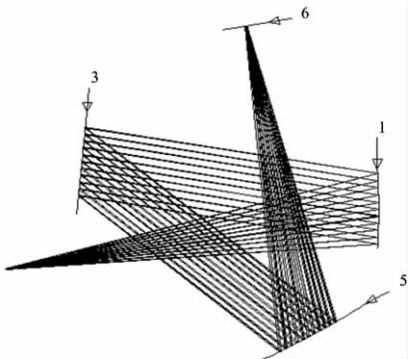


Fig 2 Simulation of the optical system

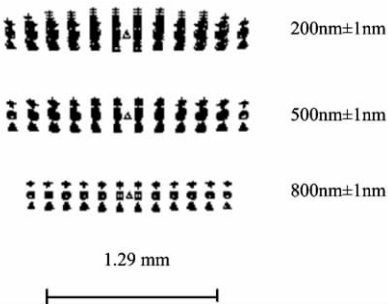


Fig 3 Spot diagram of the optical system

Table 2 Results of the real ray trace

Wavelength/nm	200	500	800
Image height/mm	1.78	1.83	1.7
Image width/mm	0.33	0.29	0.25

图 3 为出射狭缝处形成的点列图；表 2 是对系统进行实际光线追迹的光斑尺寸。根据像面点列图和实际光线追迹的结果可以看出，像面上光斑的最大高度为 1.83 mm，最大宽度为 0.33 mm。对于 2 nm 的光谱带宽，前置单色仪的分辨率并不高，原因是前置单色仪的焦距较短。根据式(1)，结合实际光学系统的设计结果，前置单色仪出射狭缝高度仍取为 5 mm，宽度取为 0.4 mm，以保证出射光斑无遮挡的进入测量单色仪。

2.2 测量单色仪

保持前置单色仪各项系统参数不变，在此基础上，以 1 200 线·mm⁻¹ 的被测光栅和对应的标准反射镜为例，仍然以 200, 500, 800 nm 为中心波长，±1 nm 为光谱带宽，对整个双光栅单色仪的光学系统进行设计和模拟。双光栅单色仪的光学系统结构参数如表 3 所示；图 4 是中心波长为 500 nm 时整个光学系统的结构模拟图。

Table 3 Structure parameters of the optics system

Surface	Y radius	Thickness	Refract mode	Non-centered
Object	Infinity	60.00	Refract	
Stop	-120.00	-45.00	Reflect	Decenter &. return
2	Infinity	0.00	Refract	Basic decenter
3	Infinity	0.00	Reflect	Decenter &. return
4	Infinity	30.00	Refract	
5	-120.00	-520.00	Reflect	Basic decenter
6	1 000.00	434.00	Reflect	Basic decenter
7	Infinity	0.00	Refract	Basic decenter
8	Infinity	0.00	Reflect	Decenter &. return
9	Infinity	-390.00	Refract	
10	1 000.00	480.00	Reflect	Decenter &. return
Image	Infinity	0.72	Refract	Decenter &. return

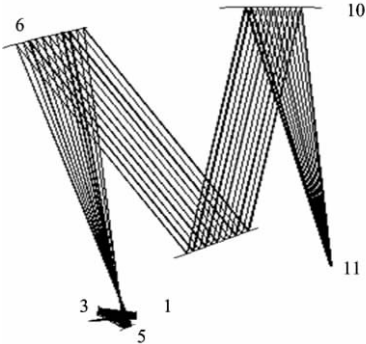


Fig 4 Simulation of the optical system

图 5 为被测标准反射镜在系统出射狭缝处形成的光斑分布；图 6 为被测光栅在系统出射狭缝处形成的光斑分布；根据像面点列图可以看出，在测量单色仪中，由于标准反射镜

对入射波长没有色散作用，并没有将入射光谱分开；而经过被测光栅衍射的出射光斑，其分辨率可以达到 1 nm，完全可以将前置单色仪中输出的 2 nm 光谱分开，可以满足仪器的测量要求。表 4 是对整个光学系统进行实际光线追迹的光斑尺寸；从实际光线追迹的结果可以看出，出射光斑的最大高度为 7.27 mm，最大宽度为 0.66 mm，因此，测量单色仪出射狭缝的高度取为 8 mm，宽度取为 0.8 mm。考虑到测量光谱范围和实际需要，选用日本 Hamamatsu 生产的 R6358 型光电倍增管，其适用的光谱范围为 185~830 nm，接收窗口的有效面积为 4 mm×13 mm，以保证出射光通量被完全接收。

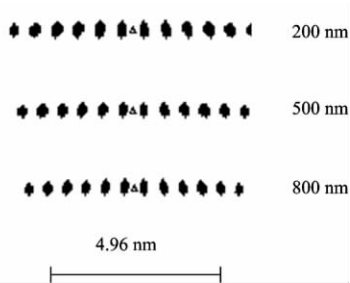


Fig 5 Spot diagram of the normal reflector

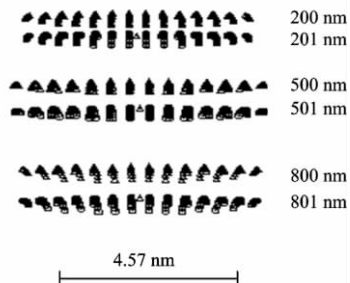


Fig 6 Spot diagram of the grating

Table 4 Results of the real ray trace

Wavelength /nm	Gratingkl		Normal reflector	
	Image height /mm	Image width /mm	Image height /mm	Image width /mm
200	6.04	0.59	7.27	0.66
500	6.78	0.44	6.77	0.49
800	6.34	0.51	6.44	0.57

3 结 论

双光栅单色仪系统是光栅衍射效率测试仪的核心组成部分，其光学系统的设计和模拟结果对光栅衍射效率测试仪的组装和调试具有不可替代的指导作用。本文通过对双光栅单色仪的光学系统进行分析并结合实际使用要求，确定了光源、探测器、光路结构和设计要求等，并根据设计要求对双光栅单色仪系统进行了光学设计和模拟，给出了像面点列图和实际光线追迹结果，从而保证了出射光斑能够完全由探测器接收，不会因出射光通量损失而引入测量误差，为仪器进

一步投入使用奠定了基础。本文的设计方法充分发挥了双光栅单色仪的优越性,并在此基础上对双单色仪系统进行逐个分析,完成了双光栅单色仪的光学系统设计和模拟,达到了仪器的使用要求。

References

- [1] LI Quan-chen, JIANG Yue-juan(李全臣, 蒋月娟). The Theory of Spectrometer(光谱仪器原理). Beijing: Beijing Institute of Technology Press(北京: 北京理工大学出版社), 1999. 190.
- [2] WU Guo-an(吴国安). Design of Optical Spectrometer(光谱仪器设计). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1978. 400.
- [3] Zimmer F, Heberer A, Sandner Th., et al. SPIE, 2007, 6466: 646605.
- [4] MA Ren-hong, LI Jing-qiu(马仁宏, 李静秋). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 1998, 6(2): 83.
- [5] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian(薛庆生, 王淑荣, 李福田). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2008, 35(7): 116.
- [6] Lu Fachun, Jarken Esimbek, Zhou Jianjun, et al. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2007, 7(2): 297.
- [7] KOU Jie-ting, Bayanheshig, TANG Yu-guo, et al(寇婕婷, 巴音贺希格, 唐玉国, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(7): 0705002.
- [8] Bayanheshig, SHAO Xian-xiu, CUI Ji-cheng, et al(巴音贺希格, 绍先秀, 崔继承, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2011, 19(1): 56.
- [9] TANG Yu-guo, SONG Nan, Bayanheshig, et al(唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(9): 1989.
- [10] PI Dao-rui, HUANG Yuan-shen, ZHANG Da-wei, et al(皮道锐, 黄元申, 张大伟, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2010, 59(2): 1009.
- [11] SUN Qiang, LU Zhen-wu, WANG Zhao-qi(孙强, 卢振武, 王肇圻). Acta Optica Sinica(光学学报), 2004, 24(6): 830.
- [12] CHEN Tan-xuan, YANG Huai-dong, CHEN Ke-xin, et al(陈谭轩, 杨怀栋, 陈科新, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(6): 1692.
- [13] WANG Shu-xin, LI Jing-lin, LIU Lei, et al(王书新, 李景林, 刘磊, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(10): 2239.
- [14] CHEN Shao-jie, TANG Yu-guo, Bayanheshig, et al(陈少杰, 唐玉国, 巴音贺希格, 等). Chinese Journal of Optics and Applied Optics(中国光学与应用光学), 2009, 2(4): 322.
- [15] LIU Ying, WANG Xue-jin, PAN Yu-long, et al(刘英, 王学进, 潘玉龙, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(3): 579.

Optical System Design of Plane Grating Double Monochromator

KOU Jie-ting^{1, 2}, Bayanheshig^{1*}, TANG Yu-guo¹, QI Xiang-dong¹, YU Hong-zhu¹

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The plane grating double monochromator is the important part of the instrument for testing diffraction efficiency of plane grating, and in order to accomplish the research of the instrument, the optical system design and simulation of the plane grating double monochromator was investigated. The instrument mainly consists of light source, front monochromator, testing monochromator and detector, and combined with the practical requirement, the corresponding light source, detector and the structure of the optical path were selected. According to the design requirement, the design and simulation of the optical system of the front monochromator and testing monochromator were done respectively, and the spot diagram of the image surface and the results of real ray trace were given. The analysis showed that in the front monochromator the maximum width of the exit spot and the maximum height of the exit spot were 0.33 and 1.83 mm respectively. On the other hand, in the testing monochromator, the maximum width of the exit spot and the maximum height of the exit spot were 0.66 and 7.27 mm, respectively. Through selecting the size of the exit slit properly, the system can work without luminous flux lost, which guarantees the testing precision of the optical system of the instrument.

Keywords Plane grating; Double monochromator; Optical design; Results analysis

* Corresponding author

(Received Jul. 27, 2011; accepted Nov. 10, 2011)