

文章编号: 1005-5630(2015)06-0498-06

凹面光栅分辨率的检测方法研究

苏仰庆, 黄元申, 杨海马

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 构建满足凹面光栅使用条件的精确检测系统来检测凹面光栅的分辨率, 根据系统的光源带宽、狭缝宽度和探测器像素尺寸的理论分析, 结合凹面光栅的像差分析, 给出一种凹面光栅分辨率检测系统的检测方法。系统按照 JB/T 8239. 2—95《衍射光栅技术条件》的标准方法, 定量分析出上述三个因素的影响量, 并提出了合理的计算方法, 从而在检测系统的测量值中得到了凹面光栅实际的分辨率值。通过实验验证, 实际检测结果与理论分析结果相差 0. 001 0~0. 003 7 nm, 是一种能够真实反映凹面光栅分辨率的光学检测方法。

关键词: 凹面光栅; 分辨率; 光源带宽; 狭缝宽度; 像素尺寸

中图分类号: TH 744. 1 **文献标志码:** A **doi:** 10. 3969/j. issn. 1005-5630. 2015. 06. 006

A study on the test method of the resolution of concave grating

SU Yangqing, HUANG Yuanshen, YANG Haima

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to detect the resolution of the concave gratings, it needs to build a precise detection system. Based on the theoretical analysis of the system of the bandwidth of light source, the slit width and the pixel size of the detector, combining with the aberration analysis of concave gratings, a method for the resolution detection system is proposed. According to the standard method in JB/T 8239. 2—95 which is named *The technical conditions for diffraction grating*, the system analyzes the above three factors quantitatively and puts forward a reasonable calculation method. Then it can obtain the practical value of concave grating resolution in the detection system. By experimental verification, the method can distinguish the difference between the test results and the theoretical analysis results from 0. 001 0 nm to 0. 003 7 nm.

Keywords: concave grating; resolution; light source bandwidth; slit width; pixel size

引 言

凹面光栅既是色散元件, 又是成像系统, 构成的光学系统更简单, 在光谱仪中应用也更为广泛。分辨率是光谱仪最重要的指标之一, 因此在装调前需要对凹面光栅进行检测^[1]。凹面光栅的使用条件不同于平面

收稿日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61378060, 61205156); 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ170004); 上海市教育委员会科研创新项目(14YZ095)

作者简介: 苏仰庆(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光栅检测系统方面的研究。E-mail: 18801929138@163. com

通信作者: 黄元申(1963—), 男, 教授, 主要从事物理光栅、全息光栅、亚波长光栅等方面的研究。E-mail: hyshyq@sina. com

光栅,其入射波和衍射波均为球面波,入射角度、入臂和出臂的长度,即光栅、入缝和探测器三者的位置,是经过消像差设计得出的^[2],不可随意放置。这给凹面光栅的检测带来困难,要根据不同凹面光栅的使用参数来构建检测系统。虽然现有的光学系统设计软件采用光线追迹法,根据点列图或对比传递函数 MTF 来评估系统的分辨率,但是由于制造安装的误差,实际分辨率要低于理论值。目前,文献中有关于凹面光栅衍射效率的理论计算研究的^[3-4],也有较多文献关注对影响凹面光栅分辨率的因素进行理论分析的,而对于分辨率检测方法的理论与实验进行综合分析研究,得出真正凹面光栅分辨率而非带入系统影响因素的研究还没有具体文献。若仅从缝光源宽度、光栅宽度及入缝宽度与分辨率的关系做定性研究,分析光栅实际分辨率恒小于理想分辨率的结论,并没有深入具体考虑整个分辨率检测系统各个因素对分辨率的综合影响,具有局限性^[5-7]。本文主要定量分析了检测系统中光源带宽、狭缝宽度及探测器各个参数对分辨率的影响,结合罗兰型凹面光栅的成像特点,计算宽波段使用范围内的凹面光栅实际分辨率。

1 影响凹面光栅分辨率检测的因素

要检测一块凹面光栅的分辨率,必须构建符合此光栅使用条件的检测系统,而检测系统的光源、狭缝和探测器以及其放置位置的精度不可避免地影响光栅检测结果。因此为了得到真正的凹面光栅分辨率必须对这些影响因素加以科学的分析,并在检测数据里,合理地加以去除。

凹面光栅的分辨率是指以点或线单色光源入射时,在像面上按照瑞利准则可分辨的最小光谱范围。在实际检测中没有这种光源,总是带有一定的尺寸大小和光谱带宽,因此应考虑它们对分辨率的影响。检测系统的光源采用标准汞灯,检测波段为 200~1 000 nm。汞灯出光用光纤耦合,用聚光透镜将光斑聚焦在狭缝中心上,以近似点光源发散球面波入射到凹面光栅表面。必须注意的是入射光经光栅衍射的特征谱线事实上有一定的带宽;狭缝上的聚焦点也有一定的尺寸大小;经过狭缝的入射球面波必须充满整个光栅表面,才能正确检测出光栅的光谱分辨本领。

1.1 光源带宽对分辨率检测的影响

如图 1 所示,假设入射单色光波长 λ 存在一个很小的谱线带宽为 $\delta\lambda$,入射角为 α ,衍射角为 β 。在不考虑像差时光栅理论最小可分辨角为 $\Delta\beta = \frac{\lambda}{Necos\beta}$,其中 N 为总刻线数, e 为有效刻线数。如果考虑像差,则其主极大的半波光谱宽度为 $\Delta\lambda_G = \frac{\lambda}{kN} + \delta \frac{d\lambda}{dl}$ ^[8],其中 δ 为像差斑的半径, k 为衍射级次。这就是要检测的凹面光栅的光谱分辨率。由于光源的非单色性,检测到的光谱半波宽度为 $(\Delta\lambda_G + \delta\lambda)$,因此在检测的数据中要剔除量 $\delta\lambda$ 。

实验中采用的低压汞灯是气体放电光源,其原子谱线并非一条严格的几何线,无论是发射线还是吸收线,都具有一定的形状,即谱线轮廓。谱线的强度随频率的改变而改变,定义 $|v_2 - v_1|$ 的值 $\Delta\nu_0$ 为频谱宽度,如图 2 所示。

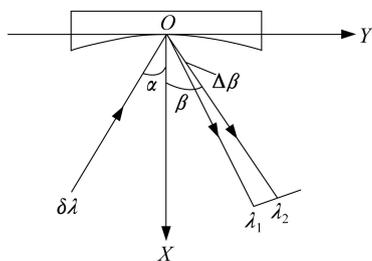


图 1 光源展宽与衍射像的关系
Fig. 1 The relationship between light broadening and diffraction image

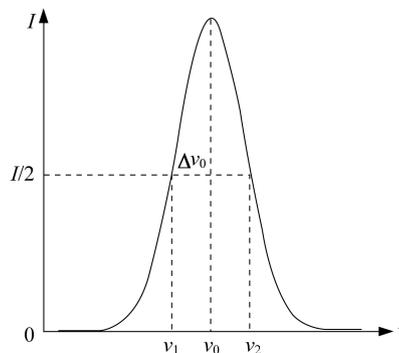


图 2 原子频谱宽度
Fig. 2 The spectrum width of atomic

假设光波的波列长度为 $2L$, 则由傅里叶频谱分析可知单色光 λ 的谱线宽度与波列长度的关系为 $\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L}$ 。低压汞灯的蒸汽压只有 $1.3 \sim 13$ Pa, 其谱线增宽主要是多普勒增宽, 谱宽为 $\delta\lambda = \frac{2\lambda}{c} \sqrt{\frac{2KT \ln 2}{m}}$, 其中 c 为光速, K 为波尔兹曼常数, T 为热力学温度, m 为原子或分子的质量^[9]。低压汞灯谱线在 300 K 时的理论多普勒增宽如表 1 所示。

表 1 低压汞灯谱线的多普勒增宽 (300 K)
Tab. 1 The Doppler broadening of low-pressure mercury lamp (300 K)

波长/nm	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0	579.0
$\Delta\lambda$ /nm	0.000 32	0.000 36	0.000 38	0.000 48	0.000 51	0.000 51

1.2 狭缝宽度对光栅分辨率检测的影响

理想的点线光源是不存在的, 要给光栅一定的光通量, 那么狭缝一定要有大小。系统分辨率虽然随狭缝宽度调小而变高, 测的光栅分辨率也越精确, 但由于检测的光能量太小, 信噪比低, 这样就降低了测量的灵敏度, 同时也降低测量的正确性。因此需要同时考虑光源和探测器的性能以及被测光栅的特性选择一个合理的狭缝宽度。如图 3 所示, 若入射狭缝的宽度为 $A_1 A_2 = a$, 其波长为 λ 的衍射像为 $B_1 B_2 = b$, 则光栅的衍射像 $b = \frac{r_B \cos \alpha}{r_A \cos \beta} \cdot a$, 其对于检测带来的分辨率降低的理论影响值为 $b/2$ 线宽度对应的光谱宽度。应用色散公式可以计算出狭缝宽度在光栅检测中带来的光谱展宽 $\Delta\lambda_A = \frac{ae \cos \alpha}{2K r_A}$, 因此在实际测量值中要减去该值。

选定波长为 435.8 nm, 通过调节狭缝的不同宽度来分析其对光栅分辨率检测的影响。图 4 分别是狭缝宽度为 $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 时检测结果对照图。从实验结果可以看出, 不同狭缝宽度对检测结果影响很大。狭缝宽度 $a = 5 \mu\text{m}$ 时, $\Delta\lambda = 0.016 5 \text{ nm}$; $a = 10 \mu\text{m}$ 时, $\Delta\lambda = 0.017 7 \text{ nm}$; $a = 50 \mu\text{m}$ 时, $\Delta\lambda = 0.021 0 \text{ nm}$; $a = 100 \mu\text{m}$ 时, $\Delta\lambda = 0.025 1 \text{ nm}$ 。减小狭缝宽度有利于提高系统的分辨率, 但是随着狭缝宽度的减小, 会使光强迅速减弱。因此, 在不影响光强的前提下应尽可能地减小狭缝宽度, 决定系统的最佳光谱带宽。过分减小狭缝宽度, 光强急剧减弱且检测结果不符合光栅实际分辨率值。通过实验数据对比, 在狭缝宽度为 $10 \mu\text{m}$ 时, 检测光强值最合适, 检测数值也最接近光栅实际分辨率值, 对应的 $\Delta\lambda_A$ 如表 2 所示。

假设被测光栅的参数值是: 空间频率 $1/e = 2\ 400 \text{ 1/mm}$, 入臂长度 $r_A = 292.098 \text{ mm}$, 检测波长 $\lambda = 435.8 \text{ nm}$, 出臂长度 $r_B = 373.8 \text{ mm}$, 狭缝宽度 $a = 10 \mu\text{m}$ 。计算狭缝宽度对光栅分辨率检测影响的光谱宽度为 $\Delta\lambda_A = 0.009 7 \text{ nm}$ 。实际测量值为 $\Delta\lambda = 0.017 7 \text{ nm}$, 低压汞灯 435.8 nm 谱线在 300 K 时的多普勒增宽为 $\delta\lambda = 0.000 38 \text{ nm}$, 则可见光栅的实际分辨率为 $\Delta\lambda_r = 0.007 6 \text{ nm}$ 。

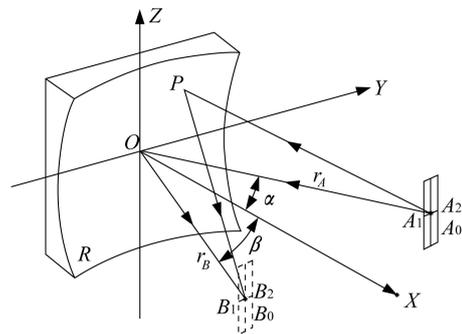


图 3 加狭缝光栅衍射示意图

Fig. 3 The grating diffraction with slit

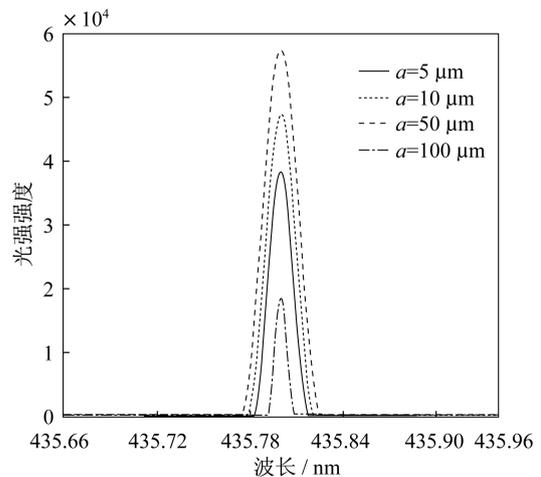


图 4 不同狭缝宽度检测结果对照图

Fig. 4 The test results with different widths of slits

表 2 10 μm 狭缝对应波长的 $\Delta\lambda_A$
 Tab. 2 The $\Delta\lambda_A$ at corresponding wavelengths with 10 μm slit width

波长/nm	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0	579.0
$\Delta\lambda_A/\text{nm}$	0.010 2	0.010 0	0.009 7	0.008 1	0.007 4	0.007 4

1.3 CCD 探测器对光栅分辨率检测的影响

因为狭缝经凹面光栅衍射后在像面上成二维光谱像,所以根据光路结构要求,为了采集到高质量的光谱像,选择面阵 CCD 放置于像面上采集图像。每个像素采集到的光能量用对应积累的电荷量来记录并转换成电压,经 A/D 转换后用数字信号输出,此时 CCD 能够分辨的最高空间频率等于它的空间采样频率 f_0 的一半,也就是光谱像在 CCD 的感光面上至少占两个像素。CCD 的光谱分辨本领是由像素尺寸和系统的线色散率决定的。假设两个相邻像素点中心间距为 p ,系统的线色散率表示为 $\frac{dl}{d\lambda}$, CCD 可分辨最

小波长差 $\Delta\lambda_c = 2p \frac{d\lambda}{dl}$, 则 CCD 的光谱分辨率本领为 $R_c = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_c} = \frac{\lambda}{2p} \cdot \frac{dl}{d\lambda}$, 由此可见 CCD 的光谱分辨本领与像素间距 p 成反比^[9]。另一方面, CCD 采样信号的过程与曝光时间和增益有关,曝光时间和增益过大会导致感光面采集到的光强太强,超出像素满阱容量,像素中的电子会溢出,从而影响相邻像素点的探测采集;曝光时间和增益过小会导致感光面采集到的光强太弱,像素点积累的电荷量无法反应实际的入射光能量,所以 CCD 存在一个曝光时间和增益的最合适值问题。

曝光时间从 8 000~2 000 ns 减小,增益从 32~18 减小时,实验检测的像素点随曝光时间的减小而减小。同一曝光时间不同增益情况下,像素点有最佳值,当增益达到一定下限时,像素点也达到了极限数值;同一增益不同曝光时间情况下,当曝光时间达到一定下限时,像素点也有极限数值。根据实验数据,本系统曝光时间为 7 000 ns,增益为 23 时是 CCD 的最佳探测模式,光强适中,像素点最合适采集到的分辨率曲线最适合数据分析。

2 实 例

针对上述的实验研究,利用 CodeV 光学设计软件,根据凹面光栅的设计要求,在宽波段模拟了罗兰圆型凹面光栅的成像系统。其光栅参数为曲率半径 400.7 mm,刻线数 $1/e = 2\ 400\ 1/\text{mm}$,入射角 $\alpha = -43.2^\circ$,有效口径为 32 mm。凹面光栅分光光路的参数如表 3 所示。

可得到仿真光路如图 5 所示,入射光经光栅分光后在像面从上往下依次分布分别为 579.0 nm、577.0 nm、546.1 nm、435.8 nm、404.7 nm 和 365.0 nm 的衍射光谱像,优化前生成的 MTF 曲线见图 6,相应波长的均方根直径 RMS 值如表 4 所示。

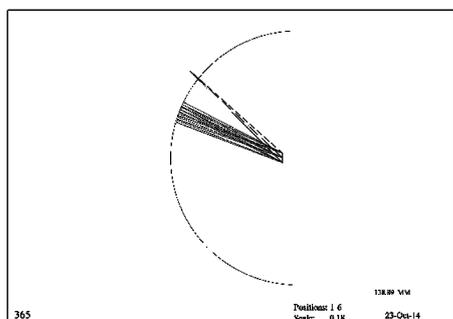


图 5 优化前的凹面光栅分光示意图
 Fig. 5 The spectral diagram of concave grating before optimization

表 3 凹面光栅分光光路参数
 Tab. 3 The parameters of concave grating spectrometer

面	曲率半径/mm	间距/mm
物体		291.6
光阑	-400.7	-323
像面	400.7	0

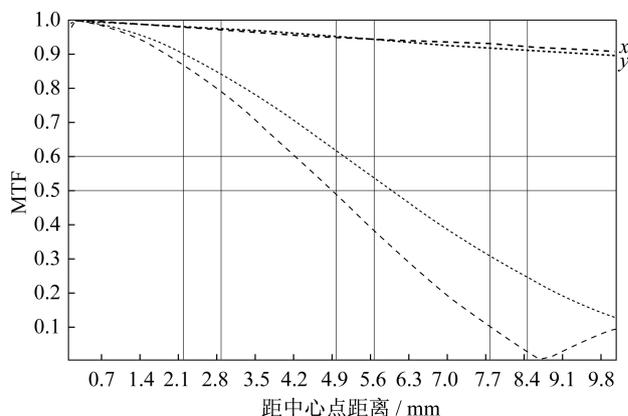


图 6 优化前的 MTF 曲线
 Fig. 6 The MTF curve before optimization

表 4 对应波长的 RMS 值

Tab. 4 The RMS with corresponding wavelengths

波长/nm	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0	579.0
RMS 值/ μm	14.989	14.943	14.231	11.680	10.959	10.036

RMS 值是一个重要的直径参数,它是弥散斑各个点坐标与参考中心点进行坐标平方和后,除以点数量后再开方的值。该值可以典型地反映一个弥散斑的大小,以定量地反映这个系统实际的斑点大小。

由以上可以看出凹面光栅在子午面和弧矢面的成像质量与极限值均有一定的差距,具有较大像差。由其初始结构并不能得到较好的成像质量,必须对凹面光栅进行消像差优化设计,减小像差。利用 CodeV 软件优化,通过点列图和 MTF 曲线对凹面光栅的成像质量进行评估。

优化后的结果如表 5 所示。

经过优化后凹面光栅的成像聚焦在像面上,如图 7 所示;优化后的 MTF 曲线和理论极限值也较为接近,可以获得高成像质量的凹面光栅,如图 8 所示;优化后相应波长的 RMS 值如表 6 所示。

表 5 优化后光路参数

Tab. 5 The optimized parameters of spectral optical path

面	曲率半径/mm	间距/mm
物体		292.08
光阑	-400.7	-403.25
像面	410.0	0

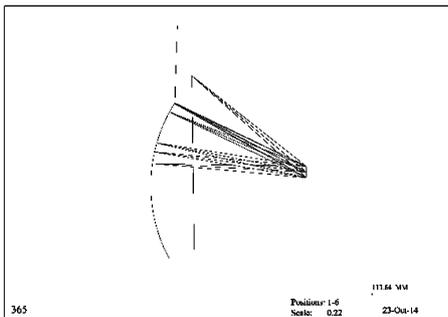


图 7 优化后分光示意图

Fig. 7 The optimized spectral diagram

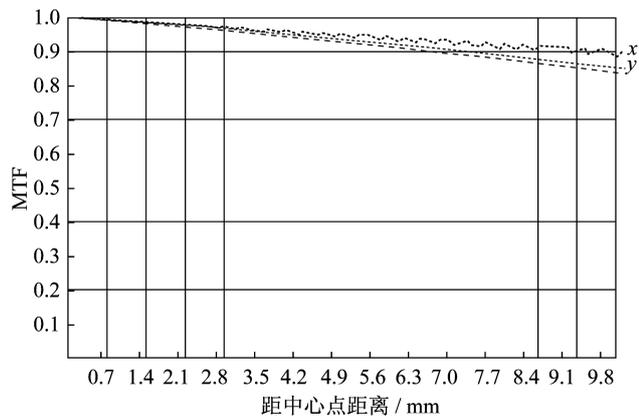


图 8 优化后 MTF 曲线

Fig. 8 The optimized spectral diagram

表 6 优化后的 RMS 值

Tab. 6 The optimized RMS

波长/nm	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0	579.0
RMS 值/ μm	0.359	0.250	0.245	0.164	0.219	0.227

通过对比可以看出,在系统中综合考虑光源带宽、狭缝宽度及凹面光栅的像差后,检测的光栅实际分辨率贴近于光栅理论分辨率,差值在 0.001 0~0.003 7 nm 之间,能够真实反映光栅的实际分辨率,光栅实际分辨率和理论分辨率的差值如表 7 所示。

表 7 光栅实际分辨率和理论分辨率对比
 Tab. 7 The difference between theoretical resolution and tested resolution

波长/nm	$\frac{d\lambda}{dL}$	$\delta\lambda/\text{nm}$	$\Delta\lambda_A/\text{nm}$	RMS 值/ μm	系统分辨率 $\Delta\lambda/\text{nm}$	光栅实际分辨率 $\Delta\lambda_G/\text{nm}$	光栅理论分辨率 $\Delta\lambda_R/\text{nm}$	差值/nm
365.0	1.02×10^{-6}	0.000 32	0.010 2	0.359 0	0.017 0	0.006 1	0.005 1	0.001 0
404.7	9.97×10^{-7}	0.000 36	0.010 0	0.250 0	0.017 5	0.006 9	0.005 6	0.001 3
435.8	9.71×10^{-7}	0.000 38	0.009 7	0.245 0	0.017 7	0.007 4	0.006 1	0.001 3
546.1	8.12×10^{-7}	0.000 48	0.008 1	0.164 0	0.020 0	0.011 3	0.007 6	0.003 7
577.0	7.44×10^{-7}	0.000 51	0.007 4	0.219 0	0.019 0	0.010 9	0.008 0	0.002 9
579.0	7.39×10^{-7}	0.000 51	0.007 4	0.227 0	0.018 0	0.009 9	0.008 0	0.001 9

3 结 论

文章首先介绍了罗兰圆型凹面光栅分辨率特性检测系统的结构及工作原理,再根据实验数据分析了光源带宽、狭缝宽度、CCD 曝光时间与增益及凹面光栅的像差对分辨率检测结果造成的影响。不同光源具有不同的线性展宽,以汞灯作为标准光源,量化出扩展光源影响的理论数据。不同狭缝宽度对结果影响不同,通过实验测试数据选取最佳狭缝宽度。考虑凹面光栅的像差并进行消像差优化设计,在系统中剔除像差对光栅实际分辨率的影响,CCD 调节合适的曝光时间与增益,得到凹面光栅的实际分辨率数值,这对凹面光栅的制作有着重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 刘盛刚,翁继东,陶天炯. 超高分辨光谱仪的分辨率检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(4):903-905.
- [2] PI D Y, HUANG Y S, ZHANG D W, et al. Optimization of the flat-field holographic concave grating in wide spectral range[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 1009-1016.
- [3] HUANG Y S, LI T, XU B L, et al. Calculation of the diffraction efficiency on concave gratings based on Fresnel-Kirchhoff's diffraction formula[J]. Applied Optics, 2013, 52(5): 1110-1116.
- [4] 李亭,黄元申,徐邦联,等. 计算凹面闪耀光栅衍射效率的通用方法[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(7):1997-2001.
- [5] 蔡履中. 光源宽度对光栅分辨本领的影响[J]. 大学物理,1985,4(10):21-23.
- [6] 王永乐. 光栅衍射试验中光栅分辨本领的观测[J]. 工科物理,1997(4):41-43.
- [7] 沈德洪. 光栅分辨率测试装置的设计[J]. 浙江大学学报,1985,19(6):142-147.
- [8] HUTLEY M C. Diffraction gratings[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [9] 祝绍箕,邹海兴,包学诚,等. 衍射光栅[M]. 北京:机械工业出版社,1986.
- [10] 于常青,刘杰,李家泽,等. 光学多通道分析仪的分辨率分析[J]. 光学技术,2001,27(2):97-102.
- [11] 严羚玮. 宽波段高分辨率 Dyson 成像光谱仪设计研究[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(4):1135-1139.
- [12] 孔鹏,唐玉国,巴音贺希格,等. 零像散宽波段平场全息凹面光栅的优化设计[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(2):565-569.
- [13] 裴梓任,黄元申,倪争技. Offner 双镜三反射成像光谱仪分辨率的研究[J]. 光学仪器,2014,36(2):147-151

(编辑:程爱婕)