

小型宽波段凹面全息光栅单色仪的优化设计

曾 瑾^{1,2} 巴音贺希格¹ 李文昊¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所国家光栅制造与应用工程技术研究中心, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 随着户外物性分析实验的日渐增多, 开发轻小型、便携式, 且响应波段范围宽的光谱仪器的需求越来越迫切。根据凹面全息光栅均方根优化理论, 设计了一款轻小型宽波段单色仪。该单色仪主要由三块 IV 型凹面全息光栅和上下两层可旋转的平台组成, 三块光栅对称地固定于上层平台上, 由一台步进电机带动上层平台旋转实现光栅之间的切换, 另一台步进电机带动下层平台旋转实现单块光栅的扫描。三块光栅的响应波长范围分别为 400~1000, 1000~1700 和 1700~2500 nm, 其理论分辨极限分别优于 2.5, 2.8 和 4.0 nm。并对三块光栅的制作误差和双层平台结构误差进行了分析, 结果表明, 在能够保证的误差范围内, 该单色仪的光谱质量可以较好地满足户外光谱分析的要求。

关键词 光栅; 凹面全息光栅; 单色仪; 消像差

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0222003

Optimum Design of Miniature Wide-Waveband Concave Holographic Grating Monochromator

Zeng Jin^{1,2} Bayanheshig¹ Li Wenhao¹

¹ National Engineering Research Center for Gratings Manufacturing and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract The need for developing miniature, portable and wide spectral covering spectrometers is urgent with the increase of field analysis experiment. A miniature wide-waveband monochromator which is comprised of three concave holographic gratings and two flat bedplates are designed based on the root-mean-square merit function. The three concave gratings are fixed on the upper flat bedplate symmetrically which is rotated by a stepper motor to switch the gratings and the other stepper motor is used to rotate the lower flat bedplate to realize the scanning movement. The response wavelength ranges of the three gratings are 400~1000, 1000~1700 and 1700~2500 nm with their corresponding theoretic resolution limit better than 2.5, 2.8 and 4.0 nm respectively. Manufacture errors, fixing errors and errors of the grating-switching flat bedplates are well analyzed for the three gratings. All the results show that within the error bounds the monochromator's spectral quality can satisfy the demands of the outdoor infrared spectrum analysis very well.

Key words gratings; concave holographic grating; monochromator; aberration correction

OCIS codes 220.2740; 050.2770; 300.6170; 300.3700

收稿日期: 2011-07-07; **收到修改稿日期:** 2011-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(60478034)、“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAK03A02)、吉林省科技发展计划项目(20070523、20086013)和国家创新方法工作专项项目(2008IM040700)资助课题。

作者简介: 曾 瑾(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事 IV 型凹面全息光栅设计与制作工艺等方面的研究。

E-mail: zeng20031985@163.com

导师简介: 巴音贺希格(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光栅理论、光栅制作及光谱技术等方面的研究。

E-mail: bayin888@sina.com

1 引 言

目前,遥感测量、地质勘探、农作物监测、海洋生物监测以及疾病诊断等现场分析研究领域不但要求光谱仪器体积要小、质量要轻,还要求其有足够宽的响应波段^[1~4],因此,开发轻小型、便携式且响应波段范围宽的光谱仪器已成为众多学者关注的热点。由于凹面全息光栅具有色散、聚焦和消像差的功能,以凹面全息光栅作为分光元件可以简化光谱仪的结构,减小其体积,因而被广泛应用于轻小型光谱仪中。国内不仅中国科学院长春光字精密机械与物理研究所、浙江大学、苏州大学和重庆大学等科研机构 and 高校对小型化凹面全息光栅光谱仪器进行过研究^[5~9],众多光谱仪器企业也相继开发了系列产品。国外也有不少知名的分析仪器企业推出过多款小型光谱仪器产品,如美国 Ocean Optics 公司的 USB2000 系列光纤光谱仪^[10]、Photo Research 公司的 PR-650 型光谱光度计^[11]和法国 Horiba 仪器公司的 Miro HR 型手动单色仪^[12]等。但是,上述小型光谱仪多数采用单块衍射光栅作为分光元件,宽波段范围内进行光谱测量的需求没有得到解决。

值得一提的是,美国 ASD 公司于 2008 年推出了一款名为 Field Spec3 的地质光谱仪^[3,13],该仪器由一台响应波段为 400~1000 nm 的凹面全息光栅光谱仪和两台响应波段分别为 1000~1800 nm 和 1700~2500 nm 的凹面全息光栅单色仪拼装而成,其结构稍显笨重。

鉴于此,本文尝试研究以单台仪器实现轻小型和宽波段单色仪的设计方法,波长范围也取为 400~2500 nm。主要设计思路是将 400~2500 nm 的光谱分为 400~1000,1000~1700 和 1700~2500 nm 三段,对每段光谱分别设计一块 IV 型凹面全息光栅,通过光栅切换装置令三块 IV 型凹面全息光栅扫描时使用相同的入缝和出缝,并令进行扫描运动的光栅基底顶点位于仪器入臂、出臂夹角的顶点处,显然这样可以大幅度减小仪器的体积。其前提是要解决好三个关键问题:1)“共使用参数”光栅的设计问题,也就是如何确保满足“共使用参数”条件的三块 IV 型凹面全息光栅有较好的消像差能力,这是保障仪器性能的基础;2)“共使用参数”光栅切换和扫描装置的设计问题,也就是如何实现三块 IV 型凹面全息光栅的切换和单块 IV 型凹面全息光栅的扫描过程中,能够确保三块光栅的“共使用参数”特性,这是保障仪器性能的关键;3)单块光栅制作误差和双层平台结构误差对光栅性能的影响,这是保

证仪器性能的必要条件。

2 “共使用参数”光栅的设计

2.1 设计原理

由于三块 IV 型凹面全息光栅是“共使用参数”光栅,所以它们有相同的使用参数,这将减少凹面全息光栅设计的自由度,不利于光栅性能的提高,为此,采用先进的光栅设计方法—均方根法^[14,15]对本文中的“共使用参数”光栅进行设计。下面简要介绍均方根法对单色仪结构的光栅进行优化的原理,单色仪结构如图 1 所示,直角坐标系 xyz 的原点 O 位于光栅基底的顶点处, x 轴为过光栅顶点 O 的光栅的法线, z 轴过光栅顶点 O 且平行于过点 O 的光栅刻线的方向。光栅的刻线是由点记录光源 C 、 D 发出的球面波干涉场与光栅基底相交形成的,点 C 到光栅顶点的距离为 r_C ,其与光栅法线的夹角为 γ ,点 D 到光栅顶点的距离为 r_D ,其与光栅法线的夹角为 δ 。入缝中心 A_0 发出的光线被光栅顶点 O 衍射后与出缝中心交与 B_0 ,以 B_0 为原点在像平面建立直角坐标系 YB_0Z ,由入缝上点 A 发出的光线被光栅表面一点 P 衍射后与像平面交与点 B 。点 O 到点 A_0 的距离为单色仪的入臂 r ,点 O 到点 B_0 的距离为单色仪的出臂 r' ,单色仪入臂和出臂的夹角 $2K$, OE 为 $2K$ 的平分线, θ 为光栅法线到 OE 的转角,单色仪入臂与光栅法线的夹角为 α ,出臂与光栅法线的夹角为 β ,当光栅绕 z 轴旋转实现波长的选择输出时,上述角度参数满足

$$\alpha = \theta + K, \quad \beta = \theta - K. \quad (1)$$

将(1)式代入光栅方程即可得到转角 θ 与衍射波长 λ 的对应关系为

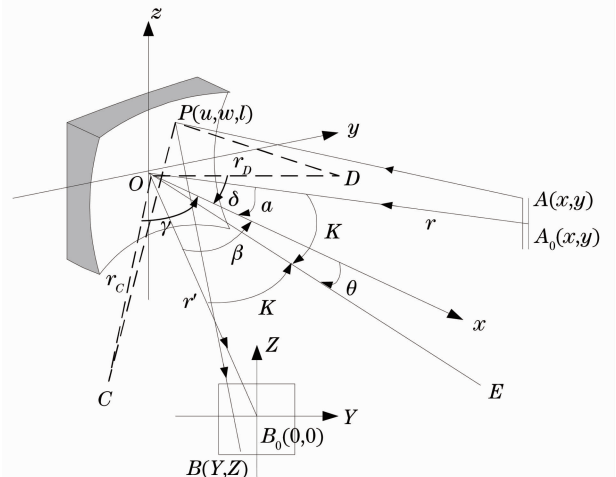


图 1 单色仪结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monochromator

$$\lambda = (2d \cos K/m) \sin \theta, \quad (2)$$

式中 d 为名义光栅常数, m 为衍射光的级次。从该式可以看出衍射波长 λ 与光栅转角 θ 的正弦值呈比例关系。

在直角坐标系 $Y B_0 Z$ 中, 设衍射光线与像平面的交点 B 的在色散方向和垂直色散方向的坐标为 (Y, Z) , 用均方根法对光栅进行优化设计时, 要求出 Y 和 Z 的均方根 $q_Y(\lambda_i)$ 和 $q_Z(\lambda_i)$, 其表达式为^[14]

$$q_Y^2(\lambda_i) = r'^2 \sec^2 \beta \left\{ \frac{1}{12} W^2 f_{100}^2 + \frac{1}{360} [W^4 (2f_{200}^2 + 9f_{100} f_{300}) + 2L^4 f_{020}^2 + 2H^4 f_{002}^2] + \frac{1}{144} [2W^2 f_{100} (L^2 f_{120} + H^2 f_{102}) + L^2 H^2 f_{011}^2] \right\}, \quad (3)$$

$$q_Z^2(\lambda_i) = r'^2 \left\{ \frac{1}{12} (L^2 g_{010}^2 + H^2 g_{001}^2) + \frac{1}{40} L^4 g_{010} g_{030} + \frac{1}{140} W^2 L^2 (g_{110}^2 + 2g_{010} g_{210}) + \frac{1}{144} H^2 [W^2 (g_{101}^2 + 2g_{001} g_{201}) + 2L^2 (g_{010} g_{012} + g_{001} g_{021})] \right\}, \quad (4)$$

式中 $f_{ijk}, g_{ijk} (i, j, k = 0, 1, 2, 3, 4)$ 分别为光栅使用参数、记录参数和记录波长的函数, 其具体表达式可见文献[15], W 为光栅基底的有效宽度、 L 为光栅基底的有效高度、 H 为光谱仪入缝的高度。令波长为 λ , 的衍射光的优化函数为 $Q(\lambda_i)$, 可表示为^[14]

$$Q(\lambda_i) = q_Y^2(\lambda_i) + \mu q_Z^2(\lambda_i), \quad (5)$$

式中 μ 为权重因子。若在光栅响应波段范围内取 N 个波长进行优化, 则该光栅的优化函数 Q 为

$$Q = \sum_{\lambda_i=\lambda_1}^{\lambda_N} \epsilon(\lambda_i) Q(\lambda_i), \quad (6)$$

式中 $\epsilon(\lambda_i)$ 为每个波长对应的权重。将(1)~(5)式代入(6)式并对其进行优化即可求得满足消像差条件的光栅参数。

2.2 设计结果与评价

取单色仪的入出臂长度均为 64 mm, 入出臂夹角为 12° , 三块光栅的名义光栅常数均为 $1/500$ mm, 使用级次均为 +1, 使用面积均为 $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$, 优化参数为每块光栅的曲率半径及其记录参数。根据每块光栅响应的波长范围 $\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}$ 的不同, 将三块光

栅依次编号为光栅 1、光栅 2 和光栅 3, 令每块光栅的曲率半径和记录参数为变量, 把它们和相应的已知参数代入(6)式进行优化的结果如表 1 所示。单块凹面全息光栅使用结构如图 2 所示, 令仪器的入缝宽度为 $50 \mu\text{m}$, 对每块凹面全息光栅响应波段范围的边缘和两个中间点处相隔为 5 nm 的波长进行光线追迹, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 由于凹面基底自身的像差特性和光栅刻槽分布的影响, 不同波长的成像光斑宽度及长度变化范围较大, 图 4(a) 和 4(b) 分别给出了全谱段范围内成像光斑在 Y 方向和 Z 方向的均方根 $q_Y(\lambda_i)$ 和 $q_Z(\lambda_i)$ 随波长变化的曲线, 可以用来判断各波长的离焦情况。

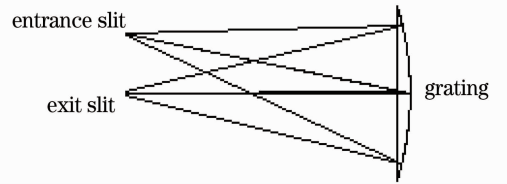


图 2 单块光栅使用结构示意图

Fig. 2 Using geometry of a single grating

表 1 三块凹面全息光栅的曲率半径和记录参数

Table 1 Curvature radii and recording parameters of the three concave holographic gratings

	$\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max} / \text{nm}$	R / mm	r_c / mm	$\gamma / (^\circ)$	r_D / mm	$\delta / (^\circ)$
Grating 1	400~1000	63.53	87.45	39.305	119.78	58.676
Grating 2	1000~1700	61.50	74.20	40.953	104.49	61.192
Grating3	1700~2500	60.00	69.27	40.907	94.05	61.120

从图 3 还可以看出, 光栅 1 和光栅 2 可以容易地把相隔 5 nm 的两个波长完全分开, 光栅 3 会使部分相隔 5 nm 的波长的点列图有部分重叠。为了能够更明确地对每块光栅的分辨极限 (Resolution limit) 进行评价, 利用光栅分辨极限的表达式^[16]

$$\Delta \lambda = d \cos \beta \Delta T / r' \quad (7)$$

来计算每块光栅理论上能分开的最小波长, 式中 ΔT 表示光谱展宽的半峰全宽, 由(7)式求得的每块光栅在不同波长处的分辨极限如表 2 所示。由表 2 可知, 第一块光栅的理论分辨极限优于 2.5 nm, 第二块光栅的理论分辨极限优于 2.8 nm, 第三块光栅的理论分辨极限优于 4 nm。

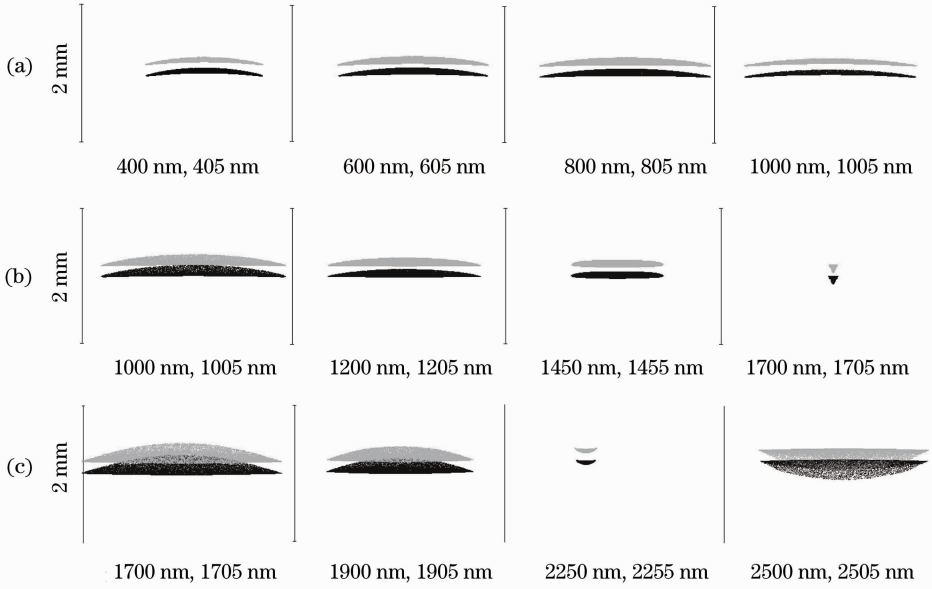


图 3 各光栅不同波长的点列图。(a)光栅 1;(b)光栅 2;(c)光栅 3

Fig. 3 Spot diagrams at different wavelengths for the three gratings. (a) Grating 1; (b) grating 2; (c) grating 3

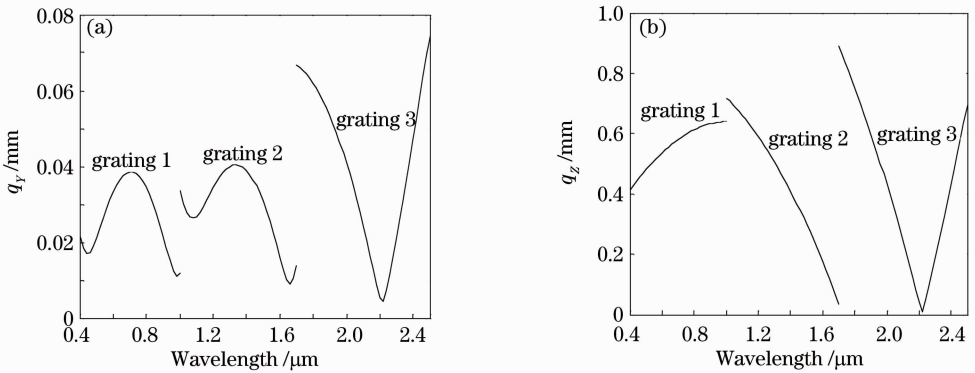


图 4 全波段范围内成像光斑的均方根随波长变化的曲线。(a) Y 方向的;(b) Z 方向的

Fig. 4 Curves of root-mean-square of imaging faculae versus the wavelengths in all corresponding wavebands.

(a) Y direction; (b) Z direction

表 2 三块凹面全息光栅的分辨极限

Table 2 Resolution limit of the three gratings

Grating 1		Grating 2		Grating 3	
Wavelength /nm	Resolution limit /nm	Wavelength /nm	Resolution limit /nm	Wavelength /nm	Resolution limit /nm
400	2.18	1000	2.78	1700	3.53
600	1.87	1200	1.53	1900	2.59
800	1.86	1450	1.20	2250	0.83
1000	2.40	1700	1.47	2500	3.92

3 “共使用参数”光栅的切换和扫描装置

考虑到三块“共使用参数”的凹面全息光栅要进行切换和扫描两种运动,本文决定采用上下两层可以旋转的平台结构,上层平台用来实现三块光栅的切换运动,下层平台用来实现单块光栅的扫描运动,

如图 5 所示。其中 1、2 和 3 分别为光栅 1、光栅 2 和光栅 3, O_1 、 O_2 和 O_3 分别为每块光栅基底的顶点,4 为单色仪的出缝,5 为单色仪的入缝,6 为实现光栅切换的等边三角形上层平台,由步进电机 M_1 带动,7 为实现单块光栅扫描的下层平台,由步进电机 M_2

带动, C_1 为上层平台的中心点, C_2 为步进电机 M_2 转轴中心线与光栅 1 对称平面 xoy 的交点。三块凹面全息光栅切换到工作位置时, 其基底顶点均要求与 C_2 点重合, 已知三块凹面全息光栅的中心厚度相同, 则两层平台结构必须满足如下条件: 1) 步进电机 M_1 转轴的中心线要过上层平台的中心点 C_1 。2) C_2 点必须在以 C_1O_1 或 C_1O_2 或 C_1O_3 为半径的圆周上。如果以上两个条件不能得到满足, 将会造成三块光栅的安装误差, 本文将在 4.2 节对该问题进行分析。

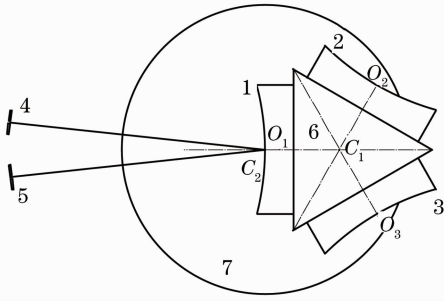


图 5 三光栅单色仪的结构图

Fig. 5 Structure geometry of the monochromator comprised of three gratings

4 误差分析

4.1 光栅制作误差

考虑到实际制作过程中能够保证的精度范围, 将距离误差设定为 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 角度误差设定为 $\pm 0.002 \text{ rad}$ 。由于光栅的分辨极限由成像光斑在 Y 方向的均方根决定, 下面着重分析光栅的制作误差对 $q_y(\lambda_i)$ 的影响。由文献[17]可知, IV 型凹面全息光栅的制作误差可以相互补偿, 选以下几组有代表性的误差进行分析:

- a. $(r_C + 0.1, r_D + 0.1, \gamma + 0.002, \delta + 0.002)$,
- b. $(r_C + 0.1, r_D - 0.1, \gamma - 0.002, \delta + 0.002)$,
- c. $(r_C + 0.1, r_D - 0.1, \gamma + 0.002, \delta - 0.002)$,
- d. $(r_C - 0.1, r_D - 0.1, \gamma - 0.002, \delta - 0.002)$,
- e. $(r_C - 0.1, r_D + 0.1, \gamma - 0.002, \delta - 0.002)$,
- f. $(r_C - 0.1, r_D + 0.1, \gamma + 0.002, \delta - 0.002)$ 。

它们对三块光栅的影响如图 6 所示, 从该图可以看出上述每组误差对三块光栅性能的影响效果基本类似, 其中 e 组误差对三块光栅性能的影响最大。

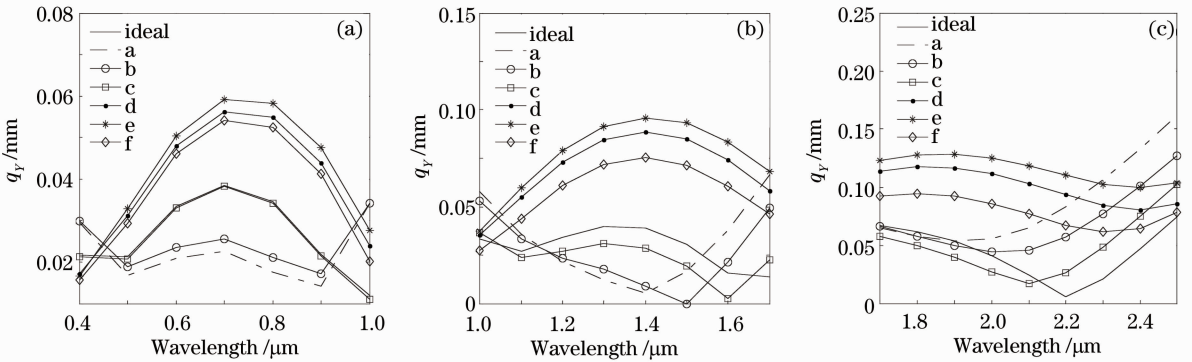


图 6 记录参数误差对光栅性能的影响。(a)光栅 1;(b)光栅 2;(c)光栅 3

Fig. 6 Recording parameter errors' effects on performance of gratings. (a) Grating 1; (b) grating 2; (c) grating 3

4.2 双层平台结构误差

图 7 所示为光栅双层平台结构误差分析的示意图, 点 A 为单色仪的入缝中心, 点 B 为单色仪的出缝中心, 点 C 为 AB 的中点, 点 C_1 为上层平台的中心点, 设步进电机 M_1 转轴的中心线与上层等边三角形平台交与点 B_1 , 当步进电机 M_1 带动上层平台转动进行光栅切换时, 光栅 1 将绕圆心为 B_1 半径为 B_1O_1 的圆周运动, 光栅 2 将绕圆心为 B_1 半径为 B_1O_2 的圆周运动, 光栅 3 将绕圆心为 B_1 半径为 B_1O_3 的圆周运动。已知三块光栅基底顶点处的厚度均为 7 mm , 上层等边三角形平台的边长为 40 mm , 以 C_1 为原点建立直角坐标系 $x C_1 y$, 参考目前能够实现的加工

精度, 以 B_1 的坐标值为 $(-0.01 \text{ mm}, 0.01 \text{ mm})$ 为例对 B_1 点与 C_1 点不重合带来的误差进行分析。光栅 1、光栅 2 和光栅 3 工作时, 其顶点与 x 轴的交点分别在 O'_1, O'_2 和 O'_3 的位置, 它们的法线与 x 轴的夹角分别为 $\angle B_1O_1C_1, \angle B_1O_2C_1$ 和 $\angle B_1O_3C_1$, 通过计算可知, 这三个角的数值分别为 0.0005 rad , 0.0007 rad 和 0 , 这远小于光栅工作时的转角, 因此可以认为光栅切换到工作位置时, 其法线与 x 轴是重合的。由上述可知 O'_1 点与 O_1 点重合, 在直角坐标系 $x C_1 y$ 中, 由等边三角形的几何关系可以求出 O_1 的坐标 $(-18.5470 \text{ mm}, 0)$, O_2 的坐标 $(16.0622 \text{ mm}, 9.2735 \text{ mm})$, O_3 的坐标 $(-16.0622 \text{ mm}, 9.2735 \text{ mm})$,

B_1O_2 的长度为 18.5507 mm, B_1O_3 的长度为 18.5607 mm。在 $\triangle C_1B_1O'_2$ 中:

$$B_1O'_2 = B_1O_2, \quad (8)$$

$$\frac{B_1O'_2}{\sin \angle B_1C_1O'_2} = \frac{B_1C_1}{\sin \angle B_1O'_2C_1}, \quad (9)$$

$$(C_1O'_2)^2 = (B_1O'_2)^2 + (B_1C_1)^2 - 2(B_1O'_2)(B_1C_1)\cos \angle O'_2B_1C_1. \quad (10)$$

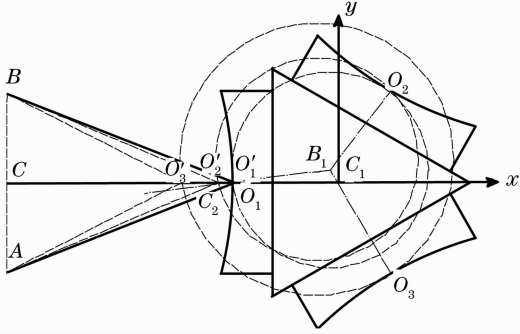


图 7 单色仪平台对准误差分析示意图
Fig. 7 Sketch map for the analysis of the alignment error of monochromator-platform

由(8)~(10)式及等边三角形的角度关系容易求出 $C_1O'_2 = 18.5509$ mm, 同理, 可以求出 $C_1O'_3 = 18.5608$ mm, 所以, O'_2 的坐标为 $(-18.5509$ mm, 0), O'_3 的坐标为 $(-18.5608$ mm, 0)。

在工作位置时, C_2 点应该与 O_1 点重合, 考虑到安装误差的影响, 设 C_2 点在 O_1 点后方 0.02 mm 处, 以光栅 1 为例进行分析。如图 8 所示, 光栅 1 切换到初始位置时, 其顶点位于 O_1 点, 光栅扫描时, O_1 点绕 C_2 点做半径为 C_2O_1 的圆周运动, 当 C_2O_1 转 θ 角度时, O_1 点位于 O'_1 点的位置, 光栅 1 的位置发生了变化, 此时, 从入缝上点 A 发出的主光线将被 O'_1 点衍射, 然后聚焦于出缝上点 B。下面对上述光栅位置变化所带来的问题进行分析, 分别以 O_1 点和 O'_1 点为原点建立直角坐标系 xO_1y 和 $x_1O'_1y_1$, 已知条件为: $C_2O_1 = 0.02$ mm, $AO_1 = 64$ mm, $BO_1 = 64$ mm,

$\angle AO_1B = 12^\circ$, 点 A (x_A, y_A) 和点 B (x_B, y_B) 在直角坐标系 xO_1y 中的坐标为 $(63.6494$ mm, 6.6869 mm) 和 $(-63.6494$ mm, 6.6869 mm)。令 $O_1O'_1$ 的距离为 s , 则 $s = 2C_2O_1 \sin(\theta/2)$, 设点 A 和点 B 在 $x_1O'_1y_1$ 中的坐标为 (x_{A1}, y_{A1}) 和 (x_{B1}, y_{B1}) , 由坐标变换可知

$$x_{A1} = x_A \cos \theta - y_A \sin \theta - s \sin(\theta/2), \quad (11)$$

$$y_{A1} = y_A \cos \theta + x_A \sin \theta + s \cos(\theta/2). \quad (12)$$

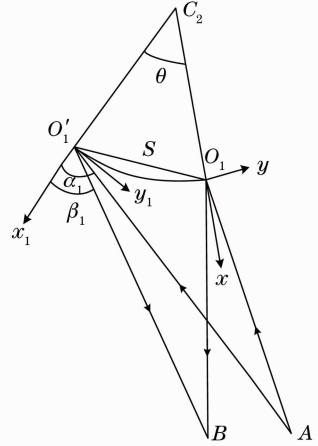


图 8 O_1 点与 C_2 点不重合时, 光栅转动误差示意图
Fig. 8 Sketch map of grating rotation with errors brought by the departure of C_2 from O_1

将已知条件代入(11)、(12)两式, 即可得到 x_{A1} , y_{A1} 的值与 θ 的关系, 其中 θ 可由(2)式求出。同理, 可以求出可得到 x_{B1} , y_{B1} 的值与 θ 的关系。在坐标系 $x_1O'_1y_1$ 中, AO'_1 与 x_1 轴的夹角为 $\alpha_1 = \arctan(y_{A1}/x_{A1})$, BO'_1 与 x_1 轴的夹角为 $\beta_1 = \arctan(y_{B1}/x_{B1})$, 入出臂夹角 $2K_1 = \alpha_1 - \beta_1$, 夹角平分线到 x 轴转角 $\theta_1 = (\alpha_1 + \beta_1)/2$, 经计算可得各个波长处 θ 与 θ_1 的差值远小于 θ 本身数值, 可以认为 θ 与 θ_1 是相等的, 因此, 输出波长的变化可以忽略。将 4.1 节中记录参数误差 e 组代入可得同时存在光栅记录误差和双层平台结构误差时光栅 1 在各个波长处的分辨极限, 如表 3 第 2 列所示。同理可得存在误差时, 光栅 2 和光栅 3 的分辨极限, 如表 3 第 4 列和第 6 列所示。

表 3 记录参数误差和双层平台结构误差对光栅分辨极限的影响

Table 3 Effects of the recording parameters errors and structure errors of the grating-switching flat bedplates on the resolution for three gratings

Grating 1		Grating 2		Grating 3	
Wavelength /nm	Resolution limit /nm	Wavelength /nm	Resolution limit /nm	Wavelength /nm	Resolution limit /nm
400	1.88	1000	1.85	1700	6.19
600	2.18	1200	3.68	1900	5.78
800	2.49	1450	4.22	2250	4.67
1000	1.55	1700	2.95	2500	5.50

由表 3 可知,同时存在记录误差和双层平台结构误差时,光栅 1 的理论分辨极限仍优于 2.5 nm,光栅 2 的理论分辨极限优于 4.3 nm,光栅 3 的理论分辨极限优于 6.2 nm,仍然能满足红外光谱分析的要求。

5 结 论

从理论上设计了一款适用野外现场分析用的轻小型宽波段凹面全息光栅单色仪,该单色仪的响应波段范围为 400~2500 nm,主要由三块响应波段范围分别为 400~1000,1000~1700 和 1700~2500 nm 的“共使用参数”IV 型凹面全息光栅和两层可旋转的平台组成。对“共使用参数”IV 型凹面全息光栅的设计和装置问题进行了研究,并对单块光栅的记录误差和双层平台结构误差进行了理论分析,结果表明,在考虑上述两种误差后,该仪器的理论分辨极限仍然较高,能满足户外从可见到红外光谱分析的要求,未来将进一步展开实验工作。

参 考 文 献

- 1 Yang Yuezhong, Cao Wenxi, Sun Zhaohua *et al.*. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102~107
杨跃忠,曹文熙,孙兆华等.海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J].*光学学报*,2009,**29**(1):102~107
- 2 Li Gang, Zhao Jing, Li Jiaying *et al.*. Visible-infrared reflectance spectroscopy applied in rapid screen of diseases[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0317001
李刚,赵静,李家星等.可见-近红外反射光谱用于疾病快速筛查[J].*光学学报*,2011,**31**(3):0317001
- 3 Zheng Baohua, Cheng Defu, Zheng Zhizhong *et al.*. Wide-range fiber spectral instrument covering [J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2010, **30**(15): 1417~1421
郑宝华,程德福,郑志忠等.宽波段光纤光谱仪[J].*光谱学与光谱分析*,2010,**30**(15):1417~1421
- 4 Wu Di, Huang Lingxia, He Yong *et al.*. Visible-near infrared reflection spectroscopy for crop weed discrimination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1618~1622
吴迪,黄凌霞,何勇等.作物和杂草叶片的可见-近红外反射光谱特性[J].*光学学报*,2008,**28**(8):1618~1622
- 5 Feng Zhiqing, Li Futian. Design of a small sized fiber grating spectrograph measuring ultraviolet spectrum [J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2004, **18**(4): 292~295
冯志庆,李福田.一种紫外光谱测量的微型光纤光栅光谱仪设计[J].*测试技术报*,2004,**18**(4):292~295
- 6 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Optimization of double grating flat field holographic concave grating spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0205001
孔鹏,巴音贺希格,李文昊等.双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J].*光学学报*,2011,**31**(2):0205001
- 7 Cheng Liang, Chen Yanping, Zhu Ruobo *et al.*. Optimum design of flat-field holographic concave grating for micro-spectrometers [J]. *J. Zhejiang University*, 2008, **42**(2): 312~316
程梁,陈燕平,朱若波等.微型光谱仪平场凹面全息光栅[J].*浙江大学学报*,2008,**42**(2):312~316
- 8 Li Chaoming, Wu Jianhong, Tang Minxue. Design of flat field holographic concave grating [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(2): 56~58
李朝明,吴建宏,唐敏学.平场全息凹面光栅的设计[J].*激光杂志*,2005,**26**(2):56~58
- 9 Du Xiaoqing, Tong Guang, Xu Qin *et al.*. Design and optimization of optical system of miniature infrared grating spectrometer [J]. *J. Basic Science and Engineering*, 2009, **17**(1): 85~91
杜小晴,童广,胥庆等.微小型红外光谱仪光学系统的设计与优化[J].*应用基础与工程科学学报*,2009,**17**(1):85~91
- 10 USB2000 Miniature Fiber Optica Spectrometer [OL]. [2011-10-27]. <http://www.oceanoptics.com/Products/usb2000.asp>
- 11 RP-655 Spectrascan Spectroradiometer [OL]. [2011-10-27]. <http://www.photoresearch.com/current/pr655.asp>
- 12 MicroHR [OL]. [2011-10-27]. <http://www.horiba.com/cn/scientific/products/optical-spectroscopy/spectrometers-monochromators/micro-hr/microhr-manual-206/>
- 13 Field Spec Sportqable Spectroradiometer [OL]. [2011-10-27]. <http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-portable-spectroradiometer>
- 14 M. Koike, T. Namioka. Merit function for the design of grating instruments [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(10): 2048~2056
- 15 T. Namioka, M. Koike, D. Content. Geometric theory of the ellipsoidal grating [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(31): 7261~7274
- 16 Chen Jiwu, Lin Zhong, Meng Qinghua. Design of flat field holographic concave grating [J]. *Optics & Precision Engineering*, 1997, **5**(1): 96~103
陈吉武,林中,孟庆华.平场全息凹面光栅的设计[J].*光学精密工程*,1997,**5**(1):96~103
- 17 Zeng Jing, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. The effect of Type-IV concave holographic grating parameter errors on spectrum qualities and their compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1005005
曾瑾,巴音贺希格,李文昊等.IV型凹面全息光栅参数误差对光谱性能的影响及补偿[J].*光学学报*,2011,**31**(10):1005005

栏目编辑:何卓铭