

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210545

# 基于凹面光栅的可调高分辨率单色仪结构设计及 波长重复性分析\*

陈建波<sup>1,2</sup>, 杨小虎<sup>1</sup>, 孙昱来<sup>1,2</sup>, 李继峰<sup>1</sup>, 林冠宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:**凹面光栅兼具成像和色散的能力,采用凹面光栅分光的单色仪能够很好实现小型化设计和应用到低于200 nm的真空紫外波段。光谱分辨率和波长重复性是单色仪的重要指标,针对单色仪的光谱分辨率,本文将光栅固有分辨率和由狭缝引起的增宽相结合推导出单色仪的光谱分辨率计算模型,利用自研微动狭缝进行实验验证,单色仪分辨率符合理论模型,极限分辨率优于0.1 nm;针对单色仪的波长重复性,在单色仪光机结构参数转换的基础上对波长重复性影响因素进行分析,推导出单色仪的波长重复性计算模型,利用汞灯作为光源进行波长重复性验证其波长重复性优于0.02 nm符合理论计算模型,验证了光机结构设计的有效性和理论分析的正确性。

**关键词:**凹面光栅单色仪;可调高分辨率;波长重复性

中图分类号: TH744.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.20

## Structure design and wavelength repeatability analysis of tunable high-resolution monochromator based on concave grating

Chen Jianbo<sup>1,2</sup>, Yang Xiaohu<sup>1</sup>, Sun Yulai<sup>1,2</sup>, Li Jifeng<sup>1</sup>, Lin Guanyu<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China)

**Abstract:** Concave grating has both imaging and dispersion capabilities, monochromators using concave gratings are well miniaturised and can be applied to the vacuum UV band below 200 nm. The spectral resolution and wavelength repeatability are important indicators of monochromators, for the spectral resolution of monochromators, this paper combines the intrinsic resolution of the grating and the broadening caused by the slit to derive a model for calculating the spectral resolution of monochromators. Experimental verification using our own micro-motion slit, the monochromator resolution is in accordance with the theoretical model, with a limit resolution better than 0.1 nm. For the wavelength repeatability of monochromator, the wavelength repeatability influencing factors are analyzed on the basis of the conversion of monochromator optical machine structure parameters, the wavelength repeatability calculation model of monochromator is derived, and the wavelength repeatability using mercury lamp as the light source is verified to be better than 0.02 nm in accordance with the theoretical calculation model, which verify the validity of the structural design of the optical machine and the correctness of the theoretical analysis.

**Keywords:** concave grating monochromator; tunable high resolution; wavelength repeatability

## 0 引言

近些年来,空间紫外-真空紫外遥感技术发展迅速,其在大气物理、太阳物理、气象学、环境科学等领域得到了重要的应用。单色仪是空间紫外-真空紫外遥感仪器研制中

所需的重要仪器,在紫外-真空紫外波段常用光栅作为分光器件<sup>[1-4]</sup>。光栅单色仪的主要构型有立特洛(Litt row)型光栅单色仪、切尔尼-特纳(Czerny-Turner)型光栅单色仪、濂谷-波冈(Seya-Namioka)型凹面光栅单色仪、艾伯特(Ebert)型光栅单色仪和孟克-吉尔逊(Monk-Gilieson)型光栅单色仪,其应用条件和性能各有差异<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期:2022-10-10 Received Date: 2022-10-10

\* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0500300)项目资助

濑谷-波冈 (Seya-Namioka) 型凹面光栅单色仪是一种罗兰圆外装置,其入射和出射狭缝都在罗兰圆外,在出射狭缝和入射狭缝都保持不动的情况下,绕光栅中心转动光栅即可完成光谱的扫描。因此单色仪的性能很大程度上受到单色仪驱动机构的影响,包括波长输出线性度和波长重复性等,目前单色仪所采用的波长扫描机构有凸轮机构和丝杠摆杆机构等<sup>[7]</sup>,凸轮机构由于自身廓线精度的问题难以满足高分辨率和高重复性的需求<sup>[8]</sup>,本文的单色仪采用丝杠摆杆机构作为单色仪的波长扫描机构,具有结构简单、精度高、线性度好的特点。

## 1 凹面全息光栅单色仪分光原理及结构设计

### 1.1 凹面全息光栅分光原理

IV型凹面全息光栅通过两个球面光束的干涉记录,记录光源的位置可以根据使用条件来改变,其刻线条纹为变线距弯条纹,主要应用于单色仪。IV型凹面全息光栅兼具成像和色散的功能,通过设计可以消除凹面光栅的像散,可以得到很高的成像质量。

IV型凹面全息光栅的分光原理如图1所示, $ON$ 为光栅法线, $OB$ 为出射光线和衍射光线的角平分线, $i$ 为入射光线和光栅法线的夹角, $\theta$ 为出射光线和光栅法线的夹角, $\varphi$ 为光栅法线 $ON$ 与入射光线和衍射光线角平分线 $OB$ 的夹角, $2\delta$ 为出射光线和衍射光谱的夹角, $l_A$ 为凹面光栅入射臂的长度,即入射狭缝 $S_1$ 到光栅中心的距离, $l_B$ 为凹面光栅出射臂的长度即入射狭缝 $S_2$ 到光栅中心的距离。当采用异侧衍射光谱作为单色仪的出射光时光栅的分光方程为<sup>[9]</sup>:

$$\sin i - \sin \theta = \frac{m\lambda}{\sigma} \quad (1)$$

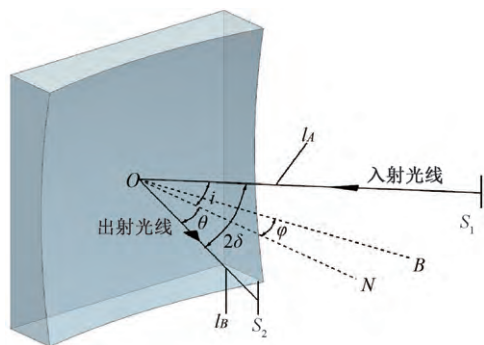


图1 IV型凹面全息光栅分光原理图

Fig. 1 Schematic diagram of type IV concave holographic grating beam splitting

在光栅转动过程中入射光线和衍射光线的夹角 $2\delta$ 保持不变,则此时入射角为 $i$ ,出射角为 $\theta$ ,其具有以下的关系:

$$\begin{cases} i - \phi = \delta \\ \theta + \phi = \delta \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)的几何关系与式(1)联立可以得到单色仪波长输出关于光栅转角 $\varphi$ 的关系式,即<sup>[10]</sup>:

$$\lambda = \frac{2\sigma \cos \delta}{m} \sin \varphi \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为光栅常数, $\delta$ 为入射光线和衍射光线夹角的 $1/2$ , $m$ 为光栅的衍射级次<sup>[11]</sup>,根据式(3)的分析可知在设计凹面光栅型单色仪驱动结构的时候,为了实现单色仪输入和输出之间的线性关系,即需要保证波长 $\lambda$ 和光栅转角正弦值 $\sin \varphi$ 之间的线性关系<sup>[12]</sup>。

### 1.2 凹面光栅单色仪结构设计

单色仪分光部分结构如图2所示,光束经过入射狭缝和入射光阑的限制后打到凹面光栅上。经凹面光栅分光后,色散后的衍射光束经过出射光阑到达出射狭缝上。其中入射光阑和出射光阑起到限制单色仪数值孔径和抑制杂散光的作用,保证在单色仪高分辨率工作时仍能够保证良好得光谱输出和较高信噪比<sup>[13]</sup>。

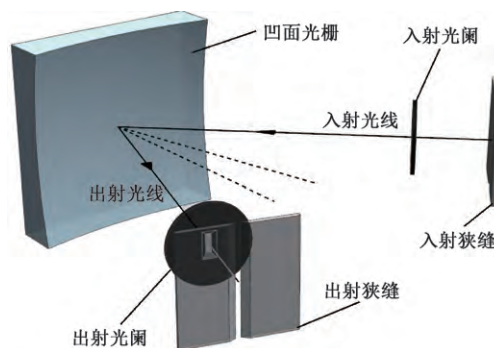


图2 单色仪分光部分工作原理图

Fig. 2 The working principle of the spectroscopic part of the monochromator

为了保证波长输入与输出之间的线性关系,设计凹面光栅单色仪驱动原理如图3所示,通过电机带动丝杠上滑块的移动,即实现对光栅轴摆杆的转角 $\alpha$ 的控制,从而实现单色仪的波长扫描,设丝杠上滑块的移动量为 $x$ 。根据单色的驱动原理,所设计的凹面光栅单色仪的驱动机构如图4所示,凹面光栅和丝杠摆杆驱动机构通过光栅轴相连,光栅轴摆杆和摆杆球头之间通过螺纹连接实现摆杆长度 $l$ 可调。在凹面光栅单色仪装配时,将光栅法线和光栅轴摆杆保持在同一竖直面上,同时在零位时将光栅轴摆杆和丝杠置于垂直位置,则光栅轴摆杆的转

角  $\alpha$  等于光栅的转角  $\varphi$ , 即可得。

$$\begin{cases} \sin \alpha = \sin \phi = \frac{x}{l} \\ \lambda = \frac{2\sigma \cos \delta}{m} \sin \phi \end{cases} \Rightarrow \lambda = \frac{2\sigma \cos \delta}{ml} \quad (4)$$

本文凹面光栅单色仪设计有效工作波段为 170 ~ 450 nm, 摆杆长度为 140 mm, 光栅常数  $\sigma = 1/1\ 200$  mm, 入射光线和衍射光谱之间的夹角为  $64^\circ$ , 对应光栅转角为  $6.91^\circ \sim 18.56^\circ$ , 丝杠行程为 16.84 ~ 44.57 mm。

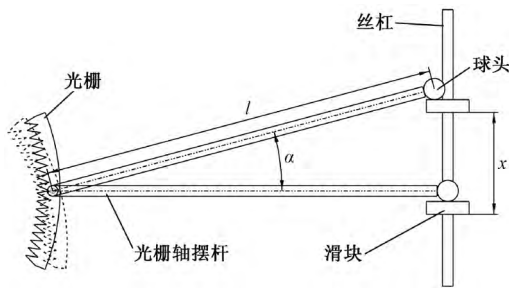


图3 凹面光栅单色仪驱动原理

Fig. 3 Concave grating monochromator drive principle

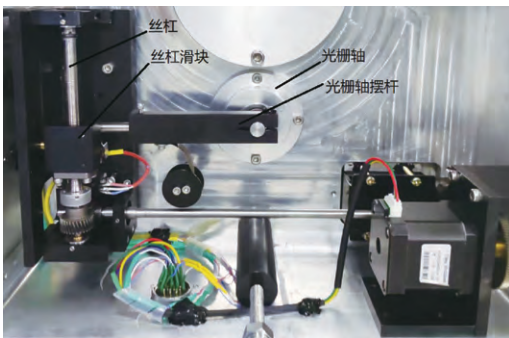


图4 凹面光栅单色仪驱动机构

Fig. 4 Concave grating monochromator drive mechanism

## 2 凹面光栅单色仪的性能分析

### 2.1 凹面光栅单色分辨率分析

单色仪在使用过程常用于对其他仪器定标, 光谱分辨率是一个重要指标, 其光谱分辨率定义为仪器可分辨的最小波长差或分辨率极限, 在实验计算中通常以光谱拟合的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 作为仪器的光谱分辨率, 记为  $(\Delta\lambda)_{\min}$ , 单色仪的光谱分辨率受到光栅固有分辨率  $(\Delta\lambda_g)_{\min}$ 、狭缝光谱增宽  $(\Delta\lambda_s)_{\min}$  两个因素的影响<sup>[14]</sup>。

光栅的固有分辨率  $(\Delta\lambda_g)_{\min}$  与光栅的衍射级次  $m$  和刻线总数  $N$  有关, 首先可以通过计算得到光栅色分辨

本领  $R_0$  为<sup>[15]</sup>:

$$R_0 = \frac{\lambda}{(\Delta\lambda)_{\min}} = mN = m \frac{W}{\sigma} \quad (5)$$

其中,  $m$  是光栅的衍射级次;  $N$  是刻线的总数;  $W$  是光栅的宽度;  $\sigma$  是光栅常数。

在设计过程中通常取光栅实际光栅色分辨本领为理想光栅色分辨本领的 0.7 倍, 这是因为考虑到光栅的制造缺陷会引起理想光栅色分辨本领的下降, 经过变换代入实际的情况可以得到光栅固有分辨率为:

$$(\Delta\lambda_g)_{\min} = \frac{\lambda}{0.7R_0} \quad (6)$$

由狭缝宽度引起的狭缝光谱增宽的计算公式为:

$$(\Delta\lambda_s)_{\min} = b \frac{d\lambda}{dl} \quad (7)$$

其中,  $b$  为狭缝的宽度,  $d\lambda/dl$  为光栅线色散率的倒数。

在光栅常数为  $\sigma$ , 衍射级次为 1 级, 不同波长  $\lambda$  的按照固定的偏向角  $2\delta$  出射时, 对应光栅法线的转角  $\varphi$ , 计算公式为:

$$\phi = \sin^{-1} \left[ \frac{m\lambda}{(2\sigma \cos \delta) \times 10^6} \right] \quad (8)$$

计入射角  $i = \delta + \varphi$ , 出射角  $\theta = \delta - \varphi$ , 光栅的线色散率可以表示为:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{\sigma l_B}{\cos \theta} \quad (9)$$

其中,  $l_B = 180$  mm 为凹面光栅出射臂长度,  $\theta$  为单色仪的出射角。

根据光栅固有分辨率和狭缝光谱增宽对单色仪光谱分辨率的影响可以得到单色仪的光谱分辨率的计算公式为:

$$(\Delta\lambda)_{\min} = \sqrt{(\Delta\lambda_g)_{\min}^2 + (\Delta\lambda_s)_{\min}^2} \quad (10)$$

由上式计算可以得到在单色仪狭缝宽度为 0.015 mm 时, 单色仪在 313 nm 处的光谱分辨率理论值为 0.076 nm, 满足单色仪的光谱分辨率优于 0.1 nm 的设计要求。同时根据分析可以发现。单色仪的光谱分辨率是由出射狭缝和入射狭缝共同决定的, 单色仪的狭缝越窄, 单色仪的光谱分辨率越高, 但同时对应的信噪比也会下降, 因此在对单色仪高光谱分辨率的性能进行验证时, 需要设计合适的探测器和探测方法<sup>[16]</sup>。

### 2.2 凹面光栅单色仪波长重复性分析

保证凹面光栅单色仪的波长重复性精度是完成单色仪 170 ~ 450 nm 波段范围内波长准确输出的基础。单色仪波长重复性表征单色仪在相同工作状态下对同一波长能够多次准确输出的能力, 其主要受到单色仪系统未定系统误差的影响。在实验测试时通过计算同一波长多次输出值的标准差表征单色仪的波长重复性, 本文所述的凹面光栅单色仪波长重复性设计指标要求小于 0.05 nm。



根据前文对单色仪线性波长扫描机构的驱动原理分析,单色仪系统输入量和波长输出量之间的关系式为式(4)。

$$\lambda = \frac{2\sigma \cos \delta}{ml} x \quad (11)$$

同时式(1)~(11)的成立依赖于在光栅零位时光栅轴摆杆和丝杠垂直这一初始条件。基于此对式(11)微分可以得到。

$$d\lambda = \frac{2\sigma \cos \delta}{ml} dx + \frac{2\cos \delta}{ml} x d\sigma - \frac{2\sigma x \sin \delta}{ml} d\delta - \frac{2\sigma \cos \delta}{ml^2} dl \quad (12)$$

根据式(12)可知,在光栅单色仪中由波长输入量所引起的影响波长重复性的因素主要有:1)光栅轴摆杆沿丝杠方向位移误差  $\Delta x$ ;2)光栅刻线引起的光栅常数误差  $\Delta \sigma$ ;3)光栅入射光线和衍射光谱的半角误差  $\Delta \delta$ ;4)光栅轴摆杆的长度误差  $\Delta l$ 。

由光栅单色仪结构量所引起的影响波长重复性的因素有:5)摆杆球头在滑块上的跳动量  $\Delta e$ ;6)光栅轴摆杆在卷簧作用下的变形量  $\Delta l_1$ ;7)光栅轴轴系间晃动误差  $\Delta l_2$ ;

对误差源1)光栅轴摆杆沿丝杠方向的位移误差主要由6点因素组成:丝杠螺距累计误差;丝杠轴向支撑间隙误差;丝杠重复定位误差;丝杠螺母空回误差;滑块和光栅轴摆杆接触面倾斜引起的滑动面误差;光栅轴摆杆零位偏差。

凹面光栅单色仪采用丝杠摆杆机构进行驱动,丝杠的诸多性能都与单色仪的波长输出息息相关,其中丝杠螺距累计误差体现在光栅轴摆杆沿丝杠方向上的位移误差,记此项误差为  $\Delta x_1$ ,其属于系统误差,这部分产生的误差为:

$$\Delta \lambda_{x1} = \frac{2\sigma \cos \delta}{ml} \Delta x_1 \quad (13)$$

丝杠轴向支撑间隙误差通过结构的设计可以将这部分误差予以消除,同时对于丝杠螺母空回误差而言如果不考虑单色仪的反向读数此项误差也可以不予考虑。

丝杠重复定位误差,本文所述的单色仪丝杠定位采用双组霍尔传感器定位方式进行定位,其具体的定位方式为安装在丝杠上的磁钢在接近低限位霍尔时,电机立即开始反向转动直至接收到精霍尔信号,从而完成单色仪的定位,采用此种定位方式可消除丝杠螺母空位误差。

但丝杠的重复定位精度很大程度上取决于霍尔定位精度,本文所述单色仪在定位时丝杠磁钢和霍尔之间的最大距离小于5 mm,保证了霍尔定位的可靠性,由丝杠

重复定位精度所引起的波长误差值为:

$$\Delta \lambda_{x2} = \frac{2\sigma \cos \delta}{ml} \Delta x_2 \quad (14)$$

由滑块和光栅轴摆杆接触面倾斜引起的滑动面误差和光栅轴摆杆零位偏差引起的误差时由结构线性的成立条件所引起的,即要求在光栅零位光栅轴摆杆和丝杠垂直。由于丝杠滑块在加工和安装时的误差,导致摆杆球头与滑块接触点的运动平面与丝杠不能保证完全的垂直,从而引起的波长误差。这两项误差值属于系统误差,在仪器装调和定标时可以予以修正。

在凹面光栅单色仪中,在光栅完成光机装调之后即对各部分点胶固化,因此对误差源2)、3)、4)来讲在单色仪完成装调之后其值就已经确定,由2)、3)、4)项所引起的误差可以由式(15)表示。

$$\Delta \lambda_2 = \left( \frac{2\cos \delta}{ml} \Delta \sigma - \frac{2\sigma}{ml} \sin \delta \Delta \delta - \frac{2\sigma \cos \delta}{ml^2} \Delta l \right) x \quad (15)$$

根据式(15)可以发现在2)、3)、4)项误差值确定之后,对波长输出误差的影响是线性的,且其属于系统误差可以通过后期的定标对波长输出误差量进行修正。

对第5)项误差,在本设计中滑块和光栅轴摆杆球头接触面粘接了一块平板玻璃,平板玻璃的粗糙度  $Ra = 0.006 \mu\text{m}$ ,对此光栅轴摆杆球头在滑块上的跳动量可以忽略不计。对第6)项误差,拉紧弹簧采用恒力卷簧拉紧光栅轴摆杆与滑块的接触面,因此摆杆的变形量  $\Delta l_1$  可以视为定值,即其属于系统误差,是可以通过定标修正的误差值。

光栅轴的转动部分采用一对高精度法兰盘挡边轴承进行支撑,在光栅轴安装完成后对其端部进行测量,测量结果显示光栅轴的径向跳动量为  $\pm 2 \mu\text{m}$ 。由光栅轴径向跳动量对波长输出的影响主要体现在在光栅轴摆杆长度上,其波长重复性误差影响计算可以表示为:

$$\Delta \lambda_{l2} = \frac{2\sigma \cos \delta}{ml^2} x \Delta l_2 \quad (16)$$

经过上述分析可以发现对单色仪波长重复性有影响的误差主要为丝杠重复定位误差和光栅轴轴系间晃动误差,属于未定系统误差,两项误差相互独立,根据误差合成原理可以得到波长重复性误差为<sup>[17]</sup>:

$$\Delta \lambda = \sqrt{\Delta \lambda_{x2}^2 + \Delta \lambda_{l2}^2} \quad (17)$$

本文单色仪要求波长重复性误差要求为  $\Delta \lambda = 0.05 \text{ nm}$ ,其中丝杠重复定位精度在装配前的实测值为  $\Delta x_2 = \pm 1.8 \mu\text{m}$ ,光栅轴实测径向跳动误差为  $\Delta l_2 = \pm 2 \mu\text{m}$ ,综合计算得单色仪的理论波长重复性为  $0.02 \text{ nm}$ ,满足单色仪的设计指标要求。

### 3 实验验证

本文所提出的单色仪光谱分辨率和单色仪重复性的分析方法和理论计算模型已在实验室某型号的单色仪研制中得到应用, 在本节测试中利用该单色仪进行光谱分辨率和波长重复性实验以验证前述分析方法和理论计算模型的有效性。

#### 3.1 测试系统搭建

利用实验室自研单色仪所搭建的单色仪测试系统方案如图 5 所示。单色仪测试系统由单色仪、汞灯、光电倍增管、数字皮安表、程序控制计算机等组成, 其工作原理为通过程序控制计算机驱动单色仪得对汞灯光谱进行扫描, 利用光电倍增管采集单色仪的波长输出信号, 将数据传输到程序控制计算机上完成单色仪数据的采集。单色仪采用光栅的光栅刻线间距  $d=1/1\ 200\ \text{mm}$ , 入射光线和衍射光谱的夹角为  $64^\circ$ ; 光电倍增管型号为 McPHERSON Model 654; 数字皮安表型号为 Keithley 6485。

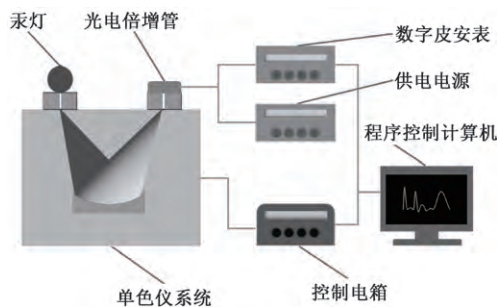


图 5 单色仪测试系统方案

Fig. 5 Monochromator test system scheme

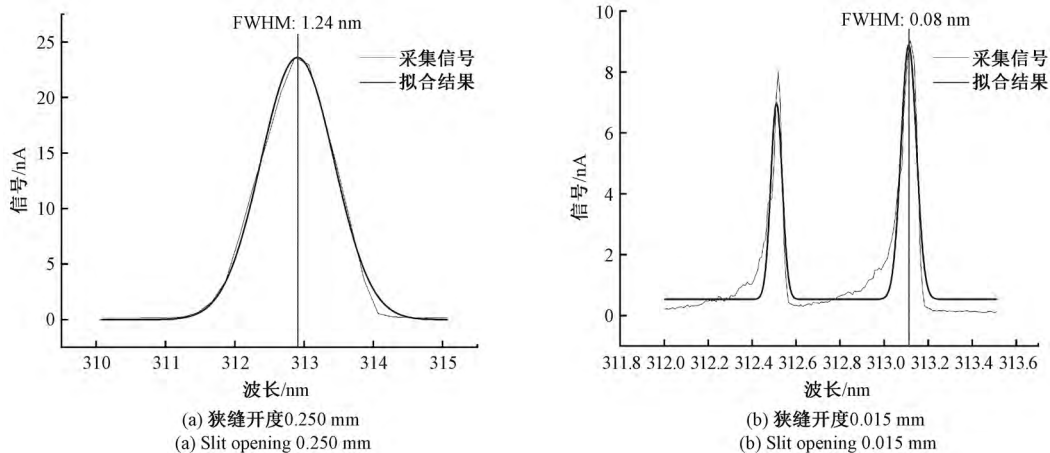


图 6 不同狭缝开度下的 313 nm 测试数据

Fig. 6 313 nm test data under different slit openings

测结果为  $0.080\ \text{nm}$ , 相对误差为  $+5.26\%$ 。在狭缝开度为  $0.250\ \text{mm}$  时, 在  $313\ \text{nm}$  处的理论光谱分辨率为

#### 3.2 单色仪极限分辨率测试

根据前文关于单色仪理论分辨率的计算可知, 单色仪的理论分辨率和狭缝的开度相关。在测试单色仪极限分辨率的时首先需要将狭缝开度和出射狭缝位置调节到合适的位置, 即严格满足单色仪出入缝匹配。在单色仪极限分辨率测试中需要满足如下条件。

1) 单色仪出缝位置在凹面光栅的最佳成像点位置, 由于凹面光栅兼具成像和色散的效果, 在对出缝和入缝位置进行装调匹配时, 应当出缝位置放置在凹面光栅出缝的最佳成像点位置;

2) 单色仪狭缝的宽高比不宜过小, 由于凹面光栅单色仪采用一块凹面光栅作为分光 and 成像器件, 虽然在设计时对其进行了消像差的设计, 但是在单色仪狭缝宽高比过小时, 由于场曲的影响会导致单色仪的分辨率明显大于理论值。

3) 提高测试数据的信噪比, 由于单色仪的能量输入值和输出值与狭缝的开度成正相关, 在使用极限分辨率时, 应当提高系统的能量输入值。

本文单色仪在进行测试时已将单色仪出缝装调至凹面光栅的最佳成像位置; 进行极限分辨率测试时, 将狭缝的宽高比设置上将宽高比设置为  $1/100$ , 即将狭缝宽度设置为  $15\ \mu\text{m}$ , 高度设置为  $1\ \text{mm}$ ; 在进行单色仪测试时, 由于使用汞灯进行测试, 其能量输入无法调节, 故提高光电倍增管的电压以替代提高单色仪的能量输入。汞灯光谱的  $313\ \text{nm}$  处的光谱利用不同的狭缝宽度进行扫描得到光谱数据如图 6 所示。

根据前文的理论计算在狭缝开度为  $15\ \mu\text{m}$  时, 可以得到汞灯在  $313\ \text{nm}$  处的理论分辨率为  $0.076\ \text{nm}$ , 实验实

测结果为  $1.24\ \text{nm}$ , 实验实测结果为  $1.24\ \text{nm}$ , 相对误差  $-1.61\%$ , 如表 1 所示。

表1 汞灯 313 nm 光谱分辨率实测值与理论值对比  
Table 1 Comparison of the measured and theoretical values of the spectral resolution of mercury lamps at 313 nm

狭缝宽度/mm	理论值/nm	实测值/nm	相对误差/%
0.250	1.26	1.24	-1.61
0.015	0.076	0.080	+5.26

实验结果和理论值符合,这证明了凹面光栅单色仪分辨率计算理论的准确性和有效性。出现误差的原因主要是狭缝的开度误差和出射狭缝不在凹面光栅衍射光束的最佳成像位置上所导致的分辨率误差。

### 3.3 单色仪重复性测试

对单色仪的重复性进行验证,选择使用汞灯的 184.892、253.652、296.728、313.937、365.015、404.656 和 435.833 nm 这 7 个特征谱线进行重复扫描,对单色仪的重复性进行验证<sup>[15]</sup>。

在单色仪的腔室内充满氮气,以削弱汞灯 200 nm 以下的波段在空气中的吸收,将汞灯安装在单色仪的入缝位置,汞灯发出的光通过漫投射板,经过入缝打到单色仪的光栅上。通过程序控制计算机对单色仪进行驱动,使衍射光谱通过狭缝依次打到出缝位置处的探测器上。通过程序控制计算机记录对应的波长位置和探测器采集的信号值。如图 7 所示是单色仪进行一个周期扫描后得到的光谱采集数据,对采集得到的特征波长处的数据处理后进行高斯拟合,即得到单色仪输出的特征波长的中心波长值。

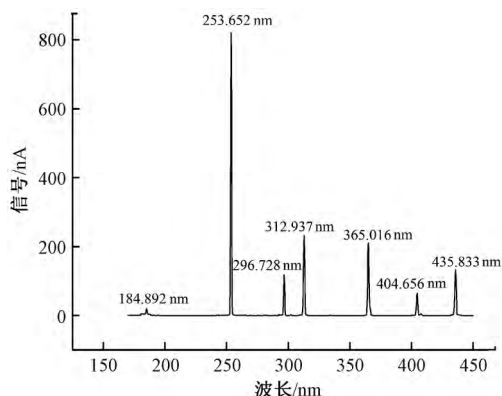


图7 单色仪全波长输出图

Fig. 7 Monochromator full wavelength output diagram

将汞灯光谱重复扫描 10 次,分别对扫描得到的 7 个特征光谱位置进行高斯拟合,得到对应的中心波长和半高宽数据。对同一特征波长的 10 次测试结果取标准差

作为在该波长处的重复性,单色仪对汞灯 7 个特征波长的重复性扫描结构如表 2 所示。

由表 2 可知,单色仪的波长重复性实测值均在理论计算重复性范围内,在短波范围单色仪的波长重复性误差值较长波范围大,推测是短波区域受到紫外吸收的影响所致。

表2 单色仪重复性理论值与实测值

Table 2 Theoretical and measured values of repeatability of monochromator

标准汞灯波长/nm	理论值/nm	实测值/nm
184.892	0.018	0.013
253.652	0.019	0.015
296.728	0.019	0.016
312.937	0.019	0.011
365.016	0.019	0.008
404.656	0.019	0.006
435.833	0.019	0.003

根据单色仪的实际测量结果,其光谱分辨率在狭缝开度为 15  $\mu\text{m}$  的时候在 313 nm 处可以达到 0.080 nm,单色仪的波长输出重复性在 0.02 nm 之内。实验测试结果与单色仪分辨率和波长重复性理论推导结果相符,这也证明了理论推导的正确性及单色仪驱动结构设计的合理性和有效性。

## 4 结 论

本文从凹面光栅的分光原理出发对凹面光栅单色仪进行了结构设计,针对单色仪的分辨率指标,结合单色仪的结构特点,确定了单色仪的分辨率理论计算模型和满足极限分辨率的条件。针对单色仪的重复性指标,结构单色仪的驱动结构设计,将光机参数进行转换后对结构各项误差源进行分析后确定了单色仪的重复性误差计算模型,在此基础上完成了单色仪的光机结构设计。选用汞灯作为光源,利用 7 个特征谱线对单色仪的波长重复性测试表明重复性满足 0.05 nm 的指标要求,利用 313 nm 波长对单色仪的光谱分辨率进行测试表明光谱分辨率与理论计算符合满足 0.1 nm 的指标要求。实验结果表明单色仪的重复性计算理论和光谱分辨率计算理论的有效性。本文所提出的单色仪光机结构设计方法和理论分析方法对同类型的光栅光谱仪器同样具备参考价值。



## 参考文献

- [ 1 ] 鲁晓峰,曾议,曹子昊,等. 大气成分临边探测光谱仪摆镜控制系统设计[J]. 大气与环境光学学报,2022,17(5):570-578.  
LU X F, ZENG Y, CAO Z H, et al. Design of a pendulum mirror control system for atmospheric composition proximity detection spectrometer[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics,2022,17(5):570-578.
- [ 2 ] 江舒,李涛,林杰俊,等. 船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(6):35-42.  
JIANG SH, LI T, LIN J J, et al. Development and application of optical fiber grating strain sensors for marine applications [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(6):35-42.
- [ 3 ] 李寒霜,李博,王淑荣. 空间紫外遥感光谱仪器偏振特性研究[J]. 光学学报,2018,38(1):193-197.  
LI H SH, LI B, WANG SH R. Study of polarization characteristics of spatial ultraviolet remote sensing spectroscopy instruments [ J ]. Journal of Optics, 2018, 38(1):193-197.
- [ 4 ] 肖思,付利平,胡秀清,等. 远紫外高光谱成像光谱仪的辐射定标技术 [ J ]. 光学学报,2022,42(2):133-140.  
XIAO S, FU L P, HU X Q, et al. Radiation calibration techniques for far-ultraviolet hyperspectral imaging spectrometers [ J ]. Journal of Optics, 2022, 42(2):133-140.
- [ 5 ] 李厚昌. 物理学[M]. 北京:化学工业出版社,2005.  
LI H CH. Physics [ M ]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [ 6 ] 鲁毅,任万杰,郭国建,等. 双罗兰圆结构光谱仪的光学系统设计[J]. 应用光学,2022,43(3):415-423.  
LU Y, REN W J, GUO G J, et al. Optical system design of a double Roland circle structured spectrometer [ J ]. Applied Optics,2022,43(3):415-423.
- [ 7 ] CHO J, GEMPERLINE P J, WALKER D. Wavelength calibration method for a CCD detector and multichannel fiber-optic probes [ J ]. Applied Spectroscopy, 1995, 49(12):1841-1845.
- [ 8 ] 李满宏,马艳悦,张明路,等. 基于凸轮机构的变刚度仿生柔性关节设计与分析[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2):213-222.  
LI M H, MA Y Y, ZHANG M L, et al. Design and analysis of variable stiffness bionic flexible joints based on cam mechanism [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2):213-222.
- [ 9 ] 曹佃生,林冠宇,杨小虎,等. 紫外双光栅光谱仪结构设计及波长精度分析[J]. 中国光学,2018,11(2):219-230.  
CAO D SH, LIN G Y, YANG X H, et al. Structural design and wavelength accuracy analysis of UV double grating spectrometer [ J ]. China Optics, 2018, 11(2):219-230.
- [ 10 ] 孙慈,杨晋,朱继伟,等. 超宽谱段高分辨率中阶梯光栅光谱仪的光学设计 [ J ]. 光学精密工程,2021,29(1):45-53.  
SUN C, YANG J, ZHU J W, et al. Optical design of an ultra-wide band high-resolution medium step grating spectrometer [ J ]. Optical Precision Engineering, 2021, 29(1):45-53.
- [ 11 ] 许典,林冠宇,曹佃生,等. 双光栅光谱仪波长扫描机构精度分析[J]. 应用光学,2017,38(1):24-30.  
XU D, LIN G Y, CAO D SH, et al. Analysis of the accuracy of wavelength scanning mechanism of double grating spectrometer [ J ]. Applied Optics, 2017, 38(1):24-30.
- [ 12 ] 曹佃生,林冠宇,杨小虎,等. 紫外双光栅光谱仪结构设计及波长精度分析[J]. 中国光学,2018,11(2):219-230.  
CAO D SH, LIN G Y, YANG X H, et al. Structural design and wavelength accuracy analysis of UV double grating spectrometer [ J ]. China Optics, 2018, 11(2):219-230.
- [ 13 ] 张尹馨,段文浩,李婉卓. 结合三反消像散光学系统的中阶梯光栅光谱仪设计[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(5):519-526.  
ZHANG Y X, DUAN W H, LI W ZH. Design of a mid-step grating spectrometer with a triple inverse dispersive optical system [ J ]. Journal of Tianjin University ( Natural Science and Engineering Technology Edition ), 2022, 55(5):519-526.
- [ 14 ] 朱学谦,钮新华,丁雷. 星载高分辨率近红外 CO<sub>2</sub> 光谱仪设计 [ C ]. 2015 年红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛论文集,2015:315-321.

ZHU X Q, NIU X H, DING L. Design of a satellite-borne high-resolution near-infrared CO<sub>2</sub> spectrometer [ C ]. Proceedings of the 2015 Symposium on Infrared, Remote Sensing Technology and Applications and Interdisciplinary Forum, 2015; 315-321.

- [ 15 ] 史建政. 便携式手机光谱仪的研制及其软件开发 [ D ]. 广州: 广东工业大学, 2015.

SHI J ZH. Development of portable cell phone spectrometer and its software development [ D ]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.

- [ 16 ] 杨增鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 小型高光谱分辨率光栅单色仪的研制 [ J ]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 273-278.

YANG Z P, TANG Y G, BAYIN H X G, et al. Development of a compact high spectral resolution grating monochromator [ J ]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(1): 273-278.

- [ 17 ] 王磊, 吴殿昊, 李玉强, 等. 基于状态方程磁电编码器角度误差主动监督补偿方法研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 94-105.

WANG L, WU D H, LI Y Q, et al. Research on active supervised compensation method of angular error based on state equation magnetolectric encoder [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 94-105.

## 作者简介



**陈建波**, 2020年于长安大学获得学士学位, 现为中国科学院大学硕士研究生, 主要研究方向为紫外光学遥感仪器研究。

E-mail: 1649716137@qq.com

**Chen Jianbo** received his B. Sc. degree from Chang'an University in 2020. He is currently a master student at University of Chinese Academy of Science. His main research interests include ultraviolet optical remote sensing instrumentation.



**林冠宇** (通信作者), 1998年于吉林工业大学获得学士学位, 2003年于吉林大学获得硕士学位, 2007年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员和博士生导师, 主要研究方向为紫外光学遥感仪器研究。

E-mail: Linguanyu1976@163.com

**Lin Guanyu** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jilin University of Technology in 1998, received his M. Sc. degree from Jilin University in 2003, and received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2007. He is currently a research fellow and a Ph. D. advisor at CIOMP. His main research interests include UV optical remote sensing instrumentation research.