

红外双光栅光谱仪波长扫描机构设计与精度分析

曹佃生¹, 林冠宇¹, 闻宝朋², 刘旭堂³

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;

²一汽轿车股份有限公司, 吉林 长春 130012;

³中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580

摘要 为满足红外双光栅光谱仪波长重复性 ± 0.05 nm 的指标要求,设计了光谱仪的波长扫描机构,分析了影响波长重复性的误差源。根据光谱仪结构特点和指标要求,设计了基于丝杠和摆杆的正弦机构作为波长扫描机构,依据凹面光栅扫描原理,推导了光机参数转换公式,分析了各误差源对波长扫描机构的影响。分析结果表明,在丝杠重复定位精度为 ± 1.2 μm 时,光谱仪在 760~2200 nm 波段范围内的重复性应优于 ± 0.05 nm。设计了红外双光栅光谱仪原理样机,并进行了实验验证。以汞灯为光源对其多个特征波长进行 7 次扫描,计算波长扫描机构在特征波长处的波长重复性。实验结果表明,光谱仪的波长重复性为 $-0.038\sim 0.041$ nm,波长扫描机构满足使用要求。

关键词 光谱学; 双光栅光谱仪; 凹面光栅; 正弦机构; 误差分析

中图分类号 TH841

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0511002

Wavelength Scanning Mechanism Design and Accuracy Analysis of Infrared Double Grating Spectrometer

Cao Diansheng¹, Lin Guanyu¹, Wen Baopeng², Liu Xutang³

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

²FAW Car Co., Ltd., Changchun, Jilin 130012, china;

³College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China

Abstract To achieve the wavelength repeatability ± 0.05 nm of the infrared double grating spectrometer, the wavelength scanning mechanism of the spectrometer is designed and the error source that influences the wavelength repeatability is analyzed. According to the structure characteristics and indicator requirements of the spectrometer, the sine mechanism based on lead screw and rocker is designed as the wavelength scanning mechanism. On the basis of concave grating scanning principle, formula from optical parameters to mechanism parameters is derived and the influences of each error source on the wavelength scanning mechanism are analyzed. The analysis results show that the repeatability of the spectrometer in the range of 760~2200 nm should be better than ± 0.05 nm when the repeated positioning accuracy of the lead screw is ± 1.2 μm . Infrared double grating spectrometer prototype is designed, and experimentally verified. Using mercury lamp as light source, the wavelength repeatability of the wavelength scanning mechanism at the characteristic wavelength is calculated after scanning each characteristic wavelength for 7 times. The experimental results show that the wavelength repeatability of the spectrometer is in the range of $-0.038\sim 0.041$ nm, and the wavelength scanning mechanism can meet the requirements of the application.

Key words spectroscopy; double grating spectrometer; concave grating; sine mechanism; error analysis

OCIS codes 300.6340; 120.6200; 050.1950; 050.2770; 350.2770; 230.1950

收稿日期: 2016-11-17; 收到修改稿日期: 2017-02-10

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器设备研制专项(41527806)、中央高校基本科研业务费专项(15CX02123A)

作者简介: 曹佃生(1987—),男,博士,助理研究员,主要从事空间光学遥感仪器光机结构设计方面的研究。

E-mail: caodiansheng1987@163.com

1 引 言

太阳辐射作为地球重要的外部能源,其能量变化具有波长依赖性,研制专门的光学仪器对太阳光在一定波段范围内进行连续高精度的测量,对于监测太阳活动变化对太阳光谱辐射的影响具有重要的科学意义^[1-6]。此外,太阳光谱辐射的精确测量对提高痕量气体的反演精度和气候效应评估具有积极的作用^[1-2,4]。

红外波段的太阳光在大气中引起的化学反应活跃度与紫外和可见光波段相比相对较小,因此光谱仪需要满足较高的光谱分辨率和波长重复性等指标要求,才能实时监测太阳光在红外波段的变化^[3,5]。由于体积、重量的限制以及高精度和降低成本的需要,此类光谱仪器多为扫描型光栅光谱仪^[5,7-9]。本研究所使用的光谱仪是一种双光栅共轴的扫描型光栅光谱仪,通过两个共轴光栅的转动实现对太阳光 760~2200 nm 波段太阳辐射能量的测量。为了实现连续高精度的测量,波长扫描机构作为活动部件,是双光栅光谱仪关键组件之一,其精度决定了光谱仪的测量精度。为了满足控制输入和波长输出的线性关系,扫描光栅的旋转轴一般由摆杆带动,摆杆的转角正弦值与波长值为线性关系,此类机构也称作正弦机构。凸轮摆杆机构和丝杠摆杆机构都可以实现这种正弦关系^[6,8-10],但是由于加工精度和光谱仪体积限制,凸轮摆杆机构很难达到所使用光谱仪所需要的波长重复性要求,因此,选择丝杠摆杆机构作为波长扫描机构对光谱仪进行了设计。

本文根据凹面光栅色散原理和光谱仪结构需求,将光学指标转换到机械参数,对光谱仪的波长扫描机构进行了设计和优化改进,分析了影响光谱仪波长重复性的误差源,依据分析结果指导光谱仪的结构设计,对设计的光谱仪进行了波长重复性测量,从而验证理论分析的正确性以及光谱仪指标的可实现性。

2 红外双光栅光谱仪工作原理

光线依次经过遮光罩、石英保护窗口、漫透射板和入射狭缝照射到第一个凹面光栅,经第一个反射镜折转后通过中间狭缝,再经第二个反射镜和光栅反射后从出射狭缝到达探测器,其整体结构如图 1 所示。

波长扫描机构简图和凹面光栅色散原理如图 2 所示^[7,10]。丝杠摆杆机构推动摆杆,使两个凹面光栅绕其顶点的连线旋转,实现波长扫描功能。图 2 中, N 为凹面光栅法线, B 为入射光线和衍射光线的角平分线, i 为入射角, θ 为衍射角, 2δ 为入射光线和衍射光线的夹角, φ 为角平分线 B 和法线 N 的夹角。

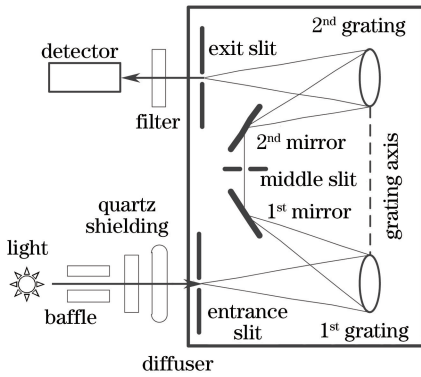


图 1 双光栅光谱仪工作原理

Fig. 1 Working principle of double grating spectrometer

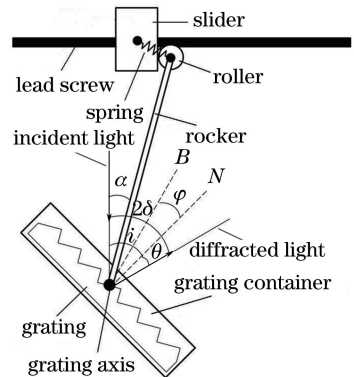


图 2 波长扫描机构和凹面光栅色散原理

Fig. 2 Wavelength scanning mechanism and dispersion principle of concave grating

根据衍射型光栅的色散公式^[7,11],有:

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

式中, m 为光栅衍射级次, d 为光栅常数, λ 为系统扫描波长,对于所用光谱仪系统, $m=1, d=1/300$ mm。

由图 2 中的夹角几何关系可得:

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

将(2)式代入(1)式并进行简化,可得:

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

光谱仪装调完毕后,各组件之间的相对位置均已确定。因此,入射光线、衍射光线以及两者之间的角平分线 B 并不随光栅的转动而转动,光栅法线 N 随光栅转动进行转动且与光栅面垂直^[12]。当滑块在定义零位时,若光栅法线 N 和角平分线 B 重合,则在光栅转动时,其两者之间的夹角 φ 和摆杆转角 α 始终相等。因此,有几何关系:

$$\sin \varphi = \sin \alpha = \frac{x}{l}, \quad (4)$$

式中, x 为滑块距离初始零位的位移, l 为摆杆长度。将(4)式代入(3)式,可得:

$$\lambda = \frac{2xd \cos \delta}{ml} \quad (5)$$

可见,光谱仪波长的位置与波长扫描机构的行程、光栅常数、入射光线与衍射光线的夹角、衍射级次以及摆杆长度等因素有关。

3 波长扫描机构设计

红外双光栅光谱仪的光栅常数 $d = 1/300$ mm,在 760~2200 nm 波段范围内对应的光栅转角为 $7.6267^\circ \sim 22.5932^\circ$,入射光线和衍射光线之间的夹角 $2\delta = 61.6^\circ$ 。考虑到光谱仪整机体积要求,取摆杆长度 $l = 140$ mm。根据几何关系,所需丝杠的有效行程 X 可以表示为

$$X = l \sin \alpha_{2200} - l \sin \alpha_{760}, \quad (6)$$

式中, α_{2200} 和 α_{760} 分别为 2200 nm 波长和 760 nm 波长对应的光栅转角(即摆杆转角)。

将相关参数代入(6)式,可得丝杠的有效行程 $X = 35.21$ mm,考虑到丝杠摆杆机构的余量及在其他系统中的兼容性,设计的丝杠的实际有效行程为 55 mm,满足本光谱仪波长扫描的使用要求。

根据图 2 所示杆波长扫描机构原理和本系统的相关参数,设计了红外双光栅光谱仪,其模型如图 3 所示。在入射狭缝前端安装遮光罩,减少外界杂散光进入系统,对不同的光学件进行分仓隔离安装,减少内部杂散光^[13]。光栅轴由一对角接触球轴承支撑,经精密装调,光栅轴晃动量可以忽略^[14]。

与传统的正弦机构相比^[9,14],本文进行了两项改进设计。

首先,将弹簧的固定端由光谱仪箱体移动到滑块上,如图 4 所示。采用较大刚度的短弹簧对滚轮和滑块进行预紧,固定端在滑块上,弹簧随滑块平移,扫描过程中滚轮相对滑块的位移及弹簧工作长度变化均较小。且滚轮和滑块之间为滚动摩擦,弹簧刚度系数不会显著影响电机驱动力矩。与固定端在光谱仪上的方案相比,弹簧振幅小,电机力矩波动小,能有效减小电机尺寸,提高结构刚度。

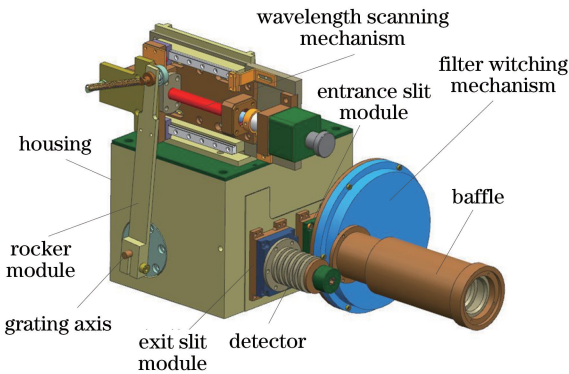


图 3 波长扫描机构模型

Fig. 3 Wavelength scanning mechanism model

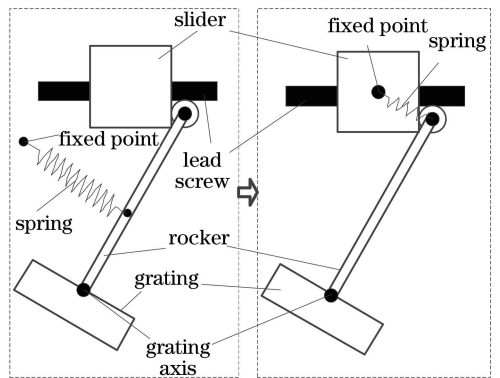


图 4 弹簧设计改进

Fig. 4 Improvement of spring design

其次,将零位的定位方式由传统的单一定位方式,改为粗、精两种定位相结合的方式,如图 5 所示。粗定位传感器安装在滑块上,与直线导轨运动方向一致,用于快速寻找零位。精定位传感器安装在丝杠旋转轴

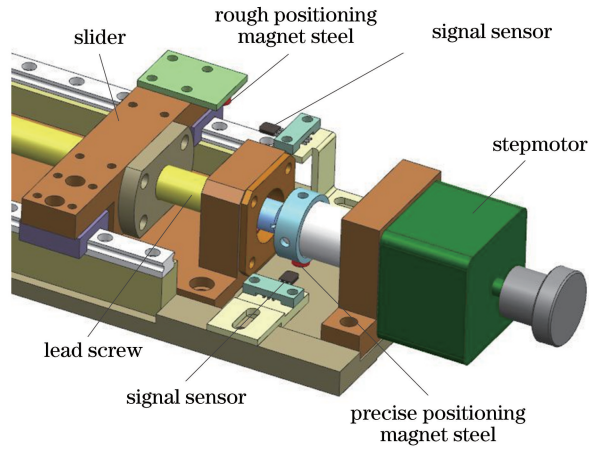


图 5 粗、精定位方式

Fig. 5 Rough and precise positioning method

上,用于精确定位零点,保证每次寻零位的重复性。

实测结果表明,传感器在滑块上的粗定位方式,根据磁钢与霍尔传感器之间的距离不同,定位精度 ΔX_c 。一般在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,因此可以推导精定位的定位精度为

$$\Delta X_j = \arctan\left(\frac{\Delta X_c}{R}\right) \cdot \frac{p}{360}, \quad (7)$$

式中, R 为磁钢沿丝杠轴的回转半径, p 为丝杠螺距,在本系统中, $R=10\ \text{mm}$, $p=0.5\ \text{mm}$ 。

计算可得,精定位的重复定位精度可以达到 $0.04\ \mu\text{m}$ 。由于采用步进电机驱动,步距角为 1.8° ,单步误差优于步距角的 3% ,因此,受步进电机精度限制,波长扫描机构的回零误差为 $1.8 \times 0.03 \times 0.5/360\ \text{mm} = 0.075\ \mu\text{m}$,满足使用要求。

4 波长重复精度误差源分析

为了准确检测太阳活动对太阳辐照的影响,需要保证在每次连续扫描时比较相同波长处的能量变化,因此要求光谱仪在完成每次扫描时波长位置的重复性要尽可能准确^[9-10,14]。所用的双光栅光谱仪的指标为:光谱仪分辨率为 $8\ \text{nm}$,波长重复性为 $\pm 0.05\ \text{nm}$ 。

根据波长扫描机构原理,扫描波长的(5)式和(4)式成立的假设,可以分析影响波长扫描机构重复性的误差源有:1)丝杠摆杆机构的重复定位误差 $\Delta x'$;2)丝杠摆杆机构的回零重复性误差 ΔX_j ;3)光栅刻线参数 d ;4)光栅入射光线和衍射光线夹角 2δ ;5)摆杆长度 l ;6)滚轮在滑块上的跳动量 Δe ;7)摆杆在弹簧作用下的变形量 $\Delta l'$;8)光栅轴的轴系晃动误差 $\Delta\beta$ 。

对于特定的凹面衍射光栅,其光栅刻线参数 d 以及光栅入射光线和衍射光线夹角 2δ 是确定的,即使存在微小的误差,其误差值也并不随波长扫描的进行而发生变化,属于系统误差,并不影响波长重复性精度。同理,对于已经加工完毕的摆杆,其长度误差也属于系统误差。在改进的波长扫描机构中,弹簧拉力实测值约为 $5\ \text{N}$,弹簧沿摆杆垂直长度方向的分力与所选深沟球轴承额定载荷 C_{0r} ($600\ \text{N}$)相比相差较大,仅起到减小游隙和保持滚轮与滑块接触的作用。弹簧沿摆杆长度方向的分力引起的最大波长变化量为 $0.00041\ \text{nm}$,远小于波长重复性指标。因此,误差源 6)和 7)均可以忽略不计。光栅轴采用背靠背安装的角接触球轴承支撑,经过精密装调后,其晃动量在角秒级别,在本系统中, $1''$ 对应的波长不确定度为 $0.0067\ \text{nm}$,远小于重复性指标,因此该误差源可以忽略不计。根据上节分析,采用粗、精定位相结合的方式,波长扫描机构的回零位置误差可以达到 $0.075\ \mu\text{m}$,对波长机构的影响也是可以忽略的。在本光谱仪中,系统误差不影响波长的重复精度,但是会影响波长的线性,即丝杠在某一位置对应的波长与理论值会存在偏差,该线性的不确定性通过精密装调和标定后可以达到指标要求,本研究的重点为波长的重复性。

因此,整个波长扫描机构的重复性精度取决于丝杠的重复定位精度。由于各误差具有独立性^[11-15-16],将

(5)式对丝杠行程 x 取微分可得:

$$\Delta\lambda = \frac{2d \cos \delta}{ml} \Delta x \quad (8)$$

根据(8)式可以计算,当波长的不确定度 $\Delta\lambda = \pm 0.05 \text{ nm}$ 时,丝杠的重复定位精度应满足 $\Delta x = \pm 1.2 \text{ }\mu\text{m}$ 。

在波长扫描机构进行装配之前对丝杠摆杆机构进行精度测量,丝杠摆杆机构标称重复定位精度为 $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$,实测重复定位精度为 $\pm 0.8 \text{ }\mu\text{m}$,满足使用要求。

5 实验验证

根据(1)式,波长为 λ 的入射光,其 m 级衍射等价于波长为 $m\lambda$ 的入射光的一级衍射,因此,使用已知波长的汞灯特征谱线的多级衍射可以对 $760\sim 2200 \text{ nm}$ 波段的波长重复性进行检验。

以 365 nm 波长及其多级谱进行验证测量为例,测量时,将汞灯放在入射狭缝前,汞灯和入射狭缝之间沿光线方向依次放置 365 nm 滤光片和漫透射板,滤光片和光谱仪遮光罩之间进行遮挡,避免杂光进入。测量装置和原理如图 6 所示,电机驱动扫描机构进行波长扫描,对探测器响应值进行采集,理论上在工作波段内,可以采集到 5 处峰值信号。但是,由于光栅衍射效率以及探测器效率等原因影响,当 $m > 4$ 时,探测器的响应已经急剧下降,所采集的信号已经不具有参考价值,所以采用 2 级、3 级和 4 级衍射光进行验证测量。

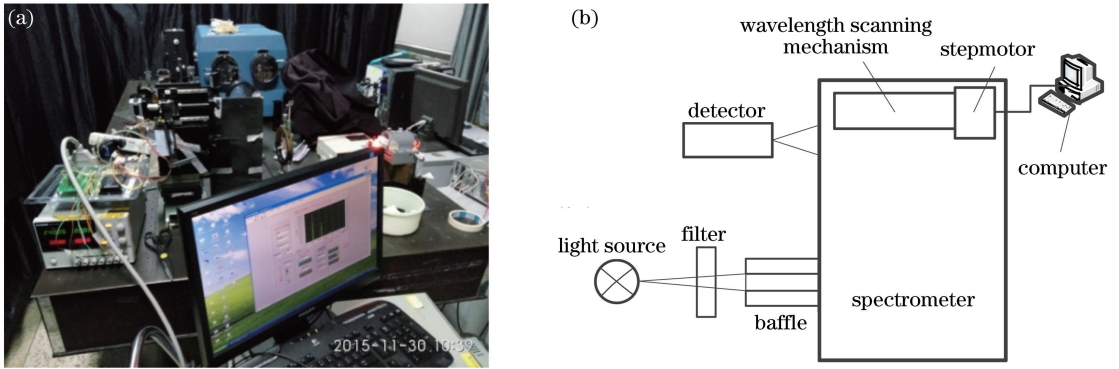


图 6 波长重复性测量(a)装置和(b)原理图

Fig. 6 (a) Setup and (b) schematic diagram of wavelength repeatability measurement

由于前端滤光片的限制,其他波长的光不能进入光谱仪,峰值只可能出现在滤光片中心波长的整数倍处。记录探测器峰值出现的位置,对测量数据进行高斯拟合,计算峰值对应的中心波长,采用 365 nm 滤光片时采集到的 3 个峰值分别如图 7 所示。波长扫描机构每次扫描完之后都进行回零,重复扫描 7 次,取 7 次探测器峰值对应中心波长的平均值作为理论中心波长,7 次测量值与平均值之间的最大差值作为波长重复性误差。

同理,将 365 nm 滤光片换成 404 nm 和 546 nm 滤光片对汞灯特征谱的不同衍射级次分别再进行多次测量,可以测得在不同波长处的重复性误差,测量结果如表 1 所示。

表 1 3 种波长不同衍射级次的波长重复性测量结果

Table 1 Wavelength repeatability measurement results with 3 wavelengths in different diffraction orders

Wavelength /nm	Diffraction order	Equivalent wavelength /nm	Wavelength uncertainty /nm
365.015	$m = 2$	730.030	0.012
365.015	$m = 3$	1095.045	-0.038
365.015	$m = 4$	1460.060	0.017
404.656	$m = 2$	730.030	0.026
404.656	$m = 3$	1134.686	0.041
404.656	$m = 4$	1539.342	-0.024
546.074	$m = 2$	809.312	-0.017
546.074	$m = 3$	1355.386	0.032

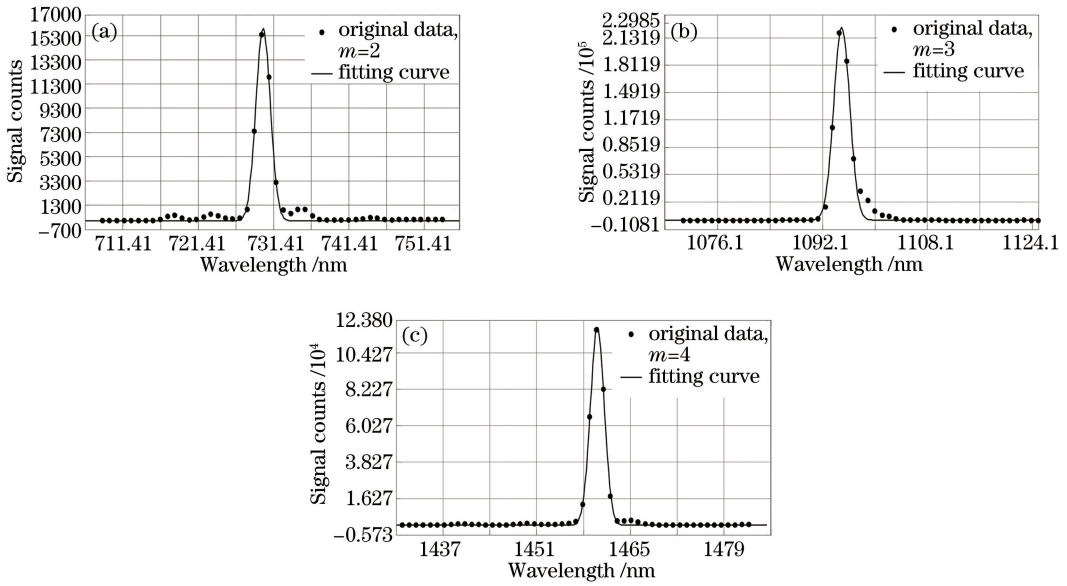


图 7 365 nm 波长不同衍射级次信号采集。(a) $m=2$; (b) $m=3$; (c) $m=4$

Fig. 7 Signal acquisition with 365 nm wavelength in different diffraction orders. (a) $m=2$; (b) $m=3$; (c) $m=4$

根据多个波长处的重复性测量结果,在采样波长处的波长重复性在 -0.038 nm 和 0.041 nm 之间,满足光谱仪波长重复性 $\pm 0.05\text{ nm}$ 的指标要求。说明光谱仪波长扫描机构设计合理,光机参数转换公式推导正确,误差源分析与机构设计相符合。

6 结 论

波长重复性是光谱仪线性定标的前提,基于传统的丝杠摆杆机构,针对所设计的光谱仪特点,对波长扫描机构进行了改进。所设计的波长扫描机构能够保证步进电机在整个扫描过程中驱动力矩波动较小,弹簧设计裕度更大,通过粗、精定位相结合的方式,保证了扫描机构的回零精度,减少了影响波长重复性的误差项,整体机构设计更加合理可靠。根据凹面光栅色散原理,对相关光机转换的公式进行了推导,分析了影响波长重复性的各个误差源,根据分析结果选择高精度的丝杠作为波长扫描机构的驱动。使用汞灯和不同波长的滤光片组合对 $760\sim 2200\text{ nm}$ 波段范围的多个采样波长进行了波长重复性验证,实验结果表明,光谱仪可以满足波长重复性 $\pm 0.05\text{ nm}$ 的要求,为波长线性标定等后续工作的开展奠定了基础。波长扫描机构的改进和误差分析方法对扫描型光栅光谱仪的设计具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] Thuillier G, Foujols T, Bolsée D, *et al.* SOLAR/SOLSPEC: Scientific objectives, instrument performance and its absolute calibration using a blackbody as primary standard source[J]. *Solar Phys*, 2009, 257(1): 185-213.
- [2] Chen Shiji, Zhou Limin, Zheng Xiangmin. Research progress in monitoring and reconstruction of Total Solar Irradiance [J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(10): 1567-1576.
陈诗吉, 周立旻, 郑祥民. 太阳总辐照度的监测与重建研究进展[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(10): 1567-1576.
- [3] Chen Xiangzi, Fang Wei, Yang Zhenling, *et al.* Main aperture area measurement of the SIAR[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0912003.
陈祥子, 方 伟, 杨振岭, 等. 太阳辐照绝对辐射计主光阑面积测量[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0912003.
- [4] Liu Chengbao, Wang Weihe, Yang Lei. Revision of solar irradiance of FY-3C/TOU [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1859-1867.
刘成保, 王维和, 杨 磊. FY-3C/臭氧总量探测仪太阳辐照度偏差的修正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1859-1867.
- [5] Liu Enchao, Li Xin, Zhang Yanna, *et al.* Spectral scanning measurement of high-precision solar irradiance-meter[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 609-613.

- 刘恩超, 李 新, 张艳娜, 等. 高精度太阳辐照度仪的光谱扫描测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 609-613.
- [6] Lin Guanyu. Analysis of wavelength accuracy and study on new wavelength calibration method for ultraviolet vertical probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(12): 2668-2674.
林冠宇. 紫外臭氧垂直探测仪波长精度分析与波长定标新方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2668-2674.
- [7] Chen Zhikun, Wang Shuxiang, Wang Yutian, *et al.* Design of grating spectrometer optical structure[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(5): 704-708.
陈至坤, 王淑香, 王玉田, 等. 光栅光谱仪光路结构的设计[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 704-708.
- [8] Zhao Shanzheng. Adjustment of synchronous rotating mechanism of grating double monochromator[J]. Optics and Precision Engineering, 1985(2): 49-53.
赵善政. 光栅双单色仪中两光栅同步转动机构的调整[J]. 光学精密工程, 1985(2): 49-53.
- [9] Wu Kun, Xue Song, Lu Qipeng, *et al.* Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 45-51.
吴 坤, 薛 松, 卢启鹏, 等. SX-700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 45-51.
- [10] Ma Lei, Lu Qipeng, Peng Zhongqi. Performance measurement for variable-included-angle plane grating monochromators[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(4): 589-592.
马 磊, 卢启鹏, 彭忠琦. 变包含角平面光栅单色器的性能检测[J]. 光电子·激光, 2011, 22(4): 589-592.
- [11] Jin Xinghuan, Chen He, Dong Jianing, *et al.* Optical design of concave grating Raman spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0930004.
金星焕, 陈 和, 董家宁, 等. 凹面光栅拉曼光谱仪的光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0930004.
- [12] Liu Kai, Xue Song, Lu Qipeng, *et al.* Precision of a variable-included angle plane-grating monochromator (PGM) at SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2009, 32(12): 881-884.
刘 楷, 薛 松, 卢启鹏, 等. 变包含角平面光栅单色仪的机械精度分析与测试[J]. 核技术, 2009, 32(12): 881-884.
- [13] Paul R Yoder. Opto-mechanical system design[M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, Transl. Beijing: China Machine Press, 2008: 411-414.
保罗·罗德·约德. 光机系统设计[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008: 411-414.
- [14] Lin Xuesong, Wang Shurong, Li Futian. Analysis of wavelength mechanism accuracy for the double model ultraviolet spectroradiometer[J]. Optical Instruments, 2007, 29(5): 55-59.
林雪松, 王淑荣, 李福田. 双模式紫外光谱辐射计的波长机构精度分析[J]. 光学仪器, 2007, 29(5): 55-59.
- [15] Jia Yong, Gao Yunguo, Shao Shuai. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(1): 0116003.
贾 勇, 高云国, 邵 帅. 热载荷下激光扩束系统的光机优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116003.
- [16] Li Anhu, Zuo Qiyu, Bian Yongming, *et al.* Assembly error analysis of laser tracking steering prisms with sub-microradian order accuracy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 9-16.
李安虎, 左其友, 卞永明, 等. 亚微弧度级激光跟踪转镜装配误差分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 9-16.