

文章编号: 1003-501X(2010)07-0092-05

新型高分辨率紫外-可见成像光谱仪 波长定标系统设计

赵发财^{1,2}, 王淑荣¹, 曲 艺¹, 李福田¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 限于常规波长定标的局限性, 构建了高分辨率紫外-可见成像光谱仪波长定标装置。该系统主要由具有高稳定性的 300 W 氙灯系统、前置施瓦兹型聚光镜、高光谱分辨力的中阶梯光栅单色仪以及后置光学系统组成。利用 ZEMAX 光学设计软件, 对该中阶梯光栅单色仪光学系统进行了优化设计。对设计结果进行了分析, 设计结果表明, 所设计的高分辨率紫外-可见成像光谱仪波长定标装置满足设计指标要求, 扫描光谱范围 270~500 nm, 光谱分辨力小于 0.05 nm, 波长精度小于 0.05 nm。

关键词: 波长定标; 中阶梯光栅; 单色仪; 光学设计

中图分类号: TH744.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.07.018

Design of a New-type High Spectral Resolution UV-VIS Spectrometer Wavelength Calibration System

ZHAO Fa-cai^{1,2}, WANG Shu-rong¹, QU Yi¹, LI Fu-tian¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: Referring to limitation of the conventional spectral calibration in Ultraviolet-Visible (UV-VIS) wave band, a high spectral resolution calibration device was built for ultraviolet-visible spectrometer. It primarily consists of a stable 300 W xenon lamp, a Schwartzschild mirror, an echelle grating monochromator, and a collimator. The optical system of the monochromator was optimized by using ZEMAX optical design software. The apparatus design is described and analyzed, and results show that it satisfies the design requirements of the monochromator. Spectral region from 270 nm to 500 nm can be scanned, and its spectral resolution is less than 0.05 nm with wavelength accuracy less than 0.05 nm.

Key words: wavelength calibration; echelle grating; monochromator; optical design

0 引 言

从二十世纪九十年代开始, 高光谱遥感已经成为国际遥感技术研究的热门课题和光电遥感的最主要手段^[1]。高光谱遥感(Hyper Spectral Remote Sensing)克服了传统单波段、多光谱遥感在波段数、波段范围、精细信息表达等方面的局限性, 以较窄的波段区间、较多的波段数量提供遥感信息, 在地球环境监测、气象、空间科学、资源等领域得到了广泛应用。最近几年, 高光谱遥感技术在大气臭氧等其它吸收气体分布探测中得到应用。紫外-可见成像光谱仪分辨率<1 nm, 光谱范围 270~500 nm 的高光谱分辨率光谱仪, 通过对太阳后向散射光谱、吸收光谱测量并通过数据反演得到大气臭氧等其它吸收气体密度分布, 为气象预测和

收稿日期: 2010-03-10; 收到修改稿日期: 2010-05-17

作者简介: 赵发财(1984-), 男(汉族), 山东淄博人。博士研究生, 主要从事空间紫外光学遥感仪器应用研究工作。E-mail: zfcboom@163.com。

全球气候变化的研究提供重要的参数^[2]。波长定标是仪器的辐射定标、确定仪器光谱范围、检测光谱分辨力等性能指标的前提,通过波长定标将探测器像元的输出信号转化为波长信号,是仪器地面定标的重要组成部分。定标光源、谱线中心位置计算、定标曲线拟合是影响波长定标精度的主要因素^[3]。光谱仪波长定标的定标光源通常选用光谱谱线灯^[4-5]和单色仪^[3],光谱谱线灯在其光谱范围内只有有限的分立光谱线且分布不均匀,由于 CCD 等面阵探测器离散像元大小的影响,对高分辨率光谱仪波长定标精度影响较大^[6];传统单色仪虽能在较宽的波段范围内输出任意波长的单色光,但由于每次只能定标一个波长,受波长扫描机构等的影响每次引入的误差不一样,当定标高分辨率光谱仪时需定标较多谱线,花费时间长操作麻烦且易受光源稳定性的影响。因此为了满足紫外—可见高分辨率成像光谱仪仪器高精度波长定标要求,设计了一套高分辨率波长定标系统。该系统主要由具有高稳定性的大功率氙灯系统和高光谱分辨力的中阶梯光栅单色仪以及后置光学系统组成。

1 阶梯光栅的原理

由光栅的角色散公式可知,如果用低级次光谱(第 1 或第 2 级),只有细刻线光栅才能获得高角色散;如果用高级次光谱(几十或上百级),则粗光栅同样可以获得高角色散。为利用高级次光谱和大入射角而特殊设计的一种光栅—阶梯光栅(Echelle)^[7-8],处于 Littrow 结构的中阶梯光栅如图 1 所示。

阶梯光栅衍射方程:

$$m\lambda = d(\sin i + \sin \theta) = t(1 + \cos \theta) - s \cdot \sin \phi = 2d \sin i \quad (\text{for small } \phi) \quad (1)$$

式中: m 为衍射级次; d 为光栅常数; s , t 分别为刻槽宽度和深度; i , θ 分别为入射角和衍射角,从阶梯光栅的法线量起; ϕ 为光线的偏向角。

$$\text{角色散:} \quad d\theta/d\lambda = (m/d)\cos \theta = (2/\lambda)\tan i \quad (2)$$

$$\text{分辨率:} \quad \lambda/\delta\lambda = mN = (Nd/\lambda)(\sin i + \sin \theta) = (2Nd/\lambda)\sin i = (2W/\lambda)\sin i \quad (3)$$

式中: N 是刻线总数, Nd 等于光栅宽度 W 。从式(2)和式(3)可以清楚地看到角色散和分辨率随着入射角的增大而增大。特别是式(2),显示角色散只与入射角有关,而与衍射级次和光栅常数无关。

单个级次色散角:

$$\delta\theta = \lambda/d \cos \theta = (2/m)\tan i \quad (4)$$

自由光谱范围:

$$\delta\lambda = \lambda/m = \lambda^2/(2d\sin i) \quad (5)$$

中阶梯光栅通常刻线较少,工作在高级次。单个级次的色散角小,一般只有几度,自由光谱范围内的波长都将出现在该级闪耀峰值附近,因此一个阶梯光栅对所有波长都是有效闪耀,阶梯光栅成为高效率闪耀光栅。设计中采用的中阶梯光栅闪耀角为 76° ,光栅常数为 72 lp/mm ,光栅的入射角和衍射角分别大约为 76.5° 和 75.5° 。根据待定标光谱仪的光谱范围,由式(1)计算得,阶梯光栅光谱衍射级次为 $100 \sim 54$ 。阶梯光栅单色仪出缝处同时输出这 57 级光谱线,这不同于常规的单色仪只输出单一级波长的谱线,具有光谱谱线灯的特点,但在光谱范围内分布比较均匀,并可进行波长扫描,增加了定标的精度和灵活性。

2 单色仪系统的设计

2.1 单色仪结构及优化设计

高分辨率紫外—可见波长定标系统主要由具有高稳定性的氙灯光源系统和高光谱分辨力的中阶梯光栅单色仪以及后置光学系统组成,结构如图 2 所示。单色仪系统是高分辨率紫外—可见波长定标系统的核心部分。该系统的主要光学特性和工作特性基本上由单色仪决定。根据紫外—可见成像光谱仪波长定标的需要确定单色仪系统的主要设计指标如表 1 所示。

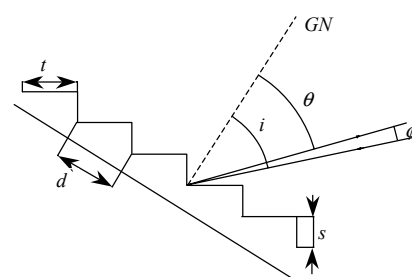


图 1 阶梯光栅的基本结构

Fig.1 Schematic diagram of an echelle grating

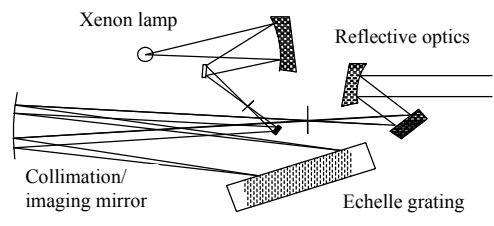


图 2 阶梯光栅单色仪基本结构图

Fig.2 Schematic diagram of echelle grating monochromator

采用光学设计软件 ZEMAX 对中阶梯光栅单色仪光学系统进行了光线追迹,并考虑了前置聚光系统的像差的影响。图 3 为中阶梯光栅单色仪的光路图,图 4、图 5、图 6 为中心波长分别为 269.51 nm、336.89 nm、499.10 nm 单色仪出缝平面上的全视场点列图分布,邻近波长间隔为 0.05 nm。水平方向为狭缝的高度方向,最大视场为 ± 2.5 mm,垂直方向为狭缝的宽度方向,视场分别为 ± 0.25 mm。

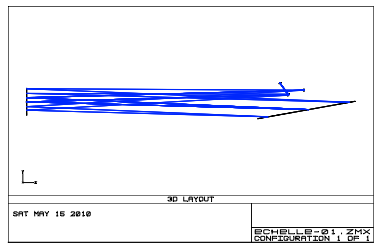


图 3 单色仪光路图

Fig.3 Optical layout of monochromator

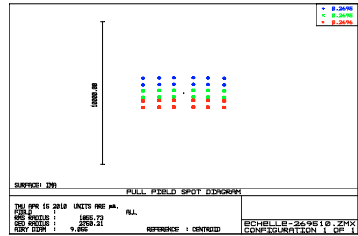


图 4 出缝处点列图分布(λ=269.51 nm)

Fig.4 Spot diagram at exit slit (λ=269.51 nm)

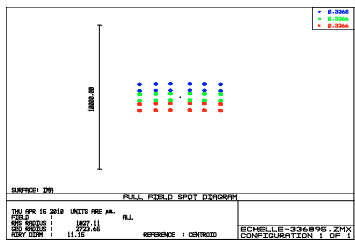


图 5 出缝处点列图分布(λ=336.89 nm)

Fig.5 Spot diagram at exit slit (λ=336.89 nm)

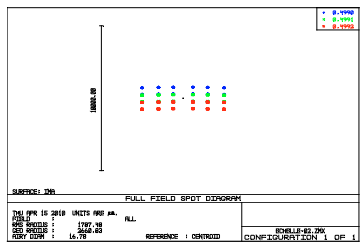


图 6 出缝处点列图分布(λ=499.10 nm)

Fig.6 Spot diagram at exit slit (λ=499.10 nm)

2.2 中阶梯光栅单色仪的光谱分辨力和带宽

单色仪重要技术指标是从出缝输出辐射的光谱带宽Δλ,可表示为^[9]

$$\Delta\lambda = \sqrt{\Delta\lambda_{\text{res}}^2 + \Delta\lambda_{\text{slit}}^2}$$
(6)

它由单色仪的固有光谱分辨力 Δλ_{res} 和狭缝宽度对应的光谱增宽 Δλ_{slit} 决定。单色仪的固有光谱分辨力 Δλ_{res} 主要有光栅衍射分辨率、光学系统像差、谱线弯曲和加工误差等决定。狭缝宽度对应的光谱增宽可以表示为

$$\Delta\lambda_{\text{slit}} = b \cdot d\lambda/dl$$
(7)

式中: b 为狭缝宽度, dλ/dl 为单色仪的线色散率倒数。

由 ZEMAX 的设计结果可得,光学系统像差、球差、彗差等和光栅衍射均远小于出缝宽度,可以忽略。因此,光谱带宽主要有出缝宽度决定,由式(7)计算得到表 2 单色仪在狭缝宽度为 0.5 mm 时,衍射级次为 54~100 的光谱带宽。

表 2 中阶梯光栅单色仪光谱分辨力

Table 2 Spectral resolution of echelle monochromator

| M | λ/nm | Δλ/nm |
|-----|---------|-------|
| 54 | 499.104 | 0.053 |
| 60 | 449.194 | 0.047 |
| 70 | 385.023 | 0.041 |
| 80 | 336.895 | 0.036 |
| 90 | 299.463 | 0.031 |
| 95 | 283.703 | 0.030 |
| 100 | 269.510 | 0.028 |

由理论分析及 ZEMAX 模拟(图 4、5、6)分析表明,除 490 nm 附近的波长,光谱分辨率略大于 0.05 nm

外, 其余均满足光谱分辨率和带宽方面的要求, 实际测量时可通过调节狭缝宽度来满足高分辨率要求。

2.3 中阶梯光栅单色仪波长扫描结构的设计

为满足高分辨率光谱仪的波长定标要求, 中阶梯光栅单色仪需实现在波长扫描功能, 由于中阶梯光栅单色仪在出缝处输出多个级次光谱, 这不同于常规的单色仪只输出单一级次光谱, 难以采用常规波长扫描机构实现波长扫描^[9-10], 由于光栅转角不大, 采用精密光学转台实现光栅扫描。设光栅倾角为 α , 则光栅公式可改为如下形式:

$$m = \frac{d(\sin i + \sin \theta)}{\lambda} = \frac{d[\sin(90^\circ - \alpha) + \sin(90^\circ - \alpha - \phi)]}{\lambda} = \frac{d[\cos \alpha + \cos(\alpha + \phi)]}{\lambda} \quad (8)$$

根据光谱仪波长定标要求, 单色仪出缝处输出范围为 270~500 nm 即同一波长处应对应两个衍射级次, 其中光栅闪耀角为 76° , 光线偏向角 ϕ 为 1° , 则有 Matlab 计算可得, 光栅倾角 α 至少应为 $12^\circ \sim 17^\circ$ 即光栅转动角度为 $12^\circ \sim 17^\circ$ 。对式(8)求导可得出缝处波长随光栅角度变化量:

$$\delta\lambda = \frac{-d[\sin \alpha + \sin(\alpha + \phi)]\delta\alpha}{\lambda} \quad (9)$$

波长精度要求 0.05 nm, 波长重复性 0.01 nm。则波长扫描步长最大设为 0.005 nm, 则有式(9)计算得光栅转角最大为 0.02° 。采用永先 RV80 系列光学精密转台由步进马达驱动, 其分辨率为 0.001° , 绝对精度为 0.01° , 单向重复度为 0.002° , 可满足波长扫描要求。

3 前置聚光 and 后置反射光学系统的设计

前置聚光系统采用施瓦兹型聚光镜将氙灯光源成像于中阶梯光栅单色仪的入射狭缝上。单色仪物方数值孔径为 0.035, 根据孔径匹配原则可确定照明系统像方数值孔径为 0.035。单色仪入缝长度为 5 mm, 氙灯两电极之间距离为 5 mm, 可计算得照明部分放大倍率为 1, 设计中放大倍率略大于 1, 使氙灯像充满入射狭缝。利用光学设计软件 ZEMAX 对前置聚光系统进行了设计并优化, 图 7 为前置聚光系统光路图, 图 8 为单色仪入缝平面上的全视场点列图分布, 可以看出像差很小, 氙灯像基本为平直像, 与单色仪直狭缝相匹配, 满足设计要求。为减小像差, 次镜采用双曲面, 主镜为球面。后置反射光学系统用于将中阶梯光栅单色仪的出射光准直, 照射待定标仪器, 为了减小光能的损失, 设计中采用平面镜和离轴抛物镜方案, 光束口径为 30 mm。用光学设计软件 ZEMAX 对后置反射光学系统进行了设计并优化, 优化时考虑了前置

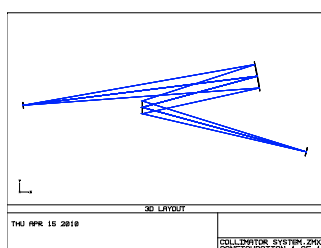


图 7 前置聚光系统光路图

Fig.7 Optical layout of input path

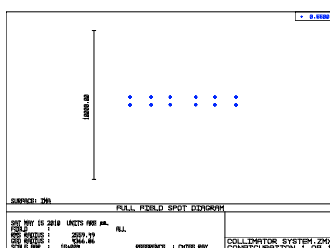


图 8 入缝处点列图分布

Fig.8 Spot diagram at entrance slit

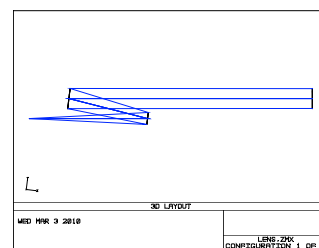


图 9 后置反射光学系统光路图

Fig.9 Optical layout of reflective optics

聚光系统和单色仪系统的像差的影响。图 9 为后置反射光学系统光路图。

4 系统定标不确定度分析

本系统测量不确定度来源主要包括由光源稳定性引起的波长变化、单色仪波长重复性和精度两个方面。氙灯光源为滨松大功率恒流源, 电源引起的光源功率波动小于 0.1%。单色仪波长重复性和精度设计指标分别为 0.05 nm 和 0.01 nm。实际单色仪重复性和精度主要由仪器理论误差、内部杂散光、机械空回、探测器和谱线中心波长读数误差等引起, 具体分析起来困难, 可根据单色仪的定标特点, 可采用 A 类不确定度,

通过利用光谱谱线灯定标得到^[2,11]。本定标系统由于采用了中阶梯光栅,在单色仪的出缝处同时输出多级谱线,这在光谱仪定标时,在光谱仪的波长范围内可提供足够多的光谱线,且分布比较均匀,这大减少了定标曲线拟合带来的误差,提高了波长定标的精度。单色仪狭缝宽度可调,光谱分辨率高,并能以小于0.005 nm步长进行扫描,这为确定光谱谱线中心位置所采用算法提供了灵活性,提高谱线位置计算的精度。

5 结 论

限于常规谱线灯或单色仪波长定标的局限性,根据中阶梯光栅原理,设计了一套高分辨率紫外-可见成像光谱仪波长定标装置,给出了它的结构组成,叙述了它的设计过程,并对设计结果进行了分析。从设计结果的分析表明,它的性能完全满足设计指标要求,光谱扫描范围270~500 nm,光谱分辨力小于0.05 nm,波长精度小于0.05 nm。该系统利用中阶梯光栅作为单色仪色散元件,定标光谱线分布均匀,强度相差不大,可一次定标多条光谱线并可以小于0.005 nm步长进行波长扫描,同时具有谱线灯法高光谱分辨率、使用简单和常规单色仪定标法覆盖仪器波长范围的优点。

参考文献:

- [1] 钱乐祥, 泮学芹, 赵芊. 中国高光谱成像遥感应用研究进展 [J]. 国土资源遥感, 2004(2): 1-6.
QIAN Le-xiang, PAN Xue-qin, ZHAO Qian. Advances in the Application and Researches of Hyperspectral Imaging Remote Sensing in China [J]. **Remote Sensing For Land & Resources**, 2004(2): 1-6.
- [2] 王加朋, 王淑荣, 徐领娣, 等. 紫外辐射计的波长定标及不确定度分析 [J]. 光电工程, 2008, 35(6): 42-47.
WANG Jia-peng, WANG Shu-rong, XU Ling-di, *et al.* Wavelength Calibration for Ultraviolet Spectroradiometer and Analysis of its Uncertainty [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2008, 35(6): 42-47.
- [3] 李新, 张国伟, 寻丽娜, 等. 短波红外平场光谱仪的波长定标 [J]. 光学学报, 2008, 28(5): 902-906.
LI Xin, ZHANG Guo-wei, XUN Li-na, *et al.* Wavelength Calibration of Shortwave Infrared Flat Spectroradiometer [J]. **Acta Optica Sinica**, 2008, 28(5): 902-906.
- [4] 靳丽红, 陈小波, 李明中, 等. 以 Hg 光源为标准谱对可见至近红外区域光谱定标的研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 1998, 35(4): 546-550.
JIN Li-hong, CHEN Xiao-bo, LI Ming-zhong, *et al.* The Study of Using Hg Source as Standard Spectrum for Wavelength Calibration in the Visible and Near-infrared Range [J]. **Journal of Sichuan University: Natural Science Edition**, 1998, 35(4): 546-550.
- [5] 徐中民, 禹秉熙. 对 PC2000-PC/104 型光谱仪的波长定标 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 11-14.
XU Zhong-min, YU Bing-xi. Wavelength calibration for PC2000-PC/104 spectrometer [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2004, 12(1): 11-14.
- [6] HUANG Xing-yue, YANG Huai-dong, HE Qing-sheng. A wavelength calibration process for micro-spectrometers with multichannel detectors [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2007, 6829: 68291Q1-68291Q11.
- [7] Schroeder D J. An Echelle Spectrometer-Spectrograph for Astronomical Use [J]. **Applied Optics(S0003-6935)**, 1967, 6(11): 1976-1980.
- [8] GEORGE R HARRISON, JAMES E ARCHER, JEAN CAMUS. A Fixed-focus broad-range echelle spectrograph of high speed and resolving power [J]. **Journal of the Optical Society of America A (S1084-7529)**, 1952, 42(10): 706.
- [9] 林中, 范世福. 光谱仪器学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
LIN Zhong, FAN Shi-fu. **Spectrometer** [M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [10] 薛庆生, 王淑荣, 宋克非, 等. 一种单光束紫外-真空紫外分光光度计的设计 [J]. 光电工程, 2008, 35(10): 102-106.
XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, SONG Ke-fei, *et al.* Design of a Single Beam UV-VUV Spectrophotometer [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2008, 35(10): 102-106.
- [11] Taylor B N, Kuyatt C E. Guideline for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results[EB/OL]. <http://physics.nist.gov/pubs/guidelines>.