

文章编号: 1003-501X(2008)07-0116-05

Ebert-Fastie 型双层结构 平面全息光栅双单色仪的光学设计

薛庆生^{1,2}, 王淑荣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 应用光学国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为满足空间紫外遥感高精度光谱辐射测量工作的要求, 设计了一种 Ebert-Fastie 型双层结构平面全息光栅双单色仪, 由球面准直聚光镜、平面和屋脊转向镜、平面全息光栅及入射、出射和中间狭缝组成, 扫描波长范围 160~400 nm。这种双层结构的特点在于两块完全相同的平面全息光栅安装在同一转轴上做到同轴转动, 不但把机构基本上简化为一个单色仪的结构, 而且确保了两块光栅同步地进行光谱扫描, 色散相加, 光谱分辨率小于 0.15 nm。此外, 前后两单色系统被隔成基本封闭的腔体, 用来割断两单色系统杂散光之间的相互影响, 抑制整个系统的杂散光, 整个系统的杂散光水平可达 10^{-6} , 满足空间紫外遥感高精度光谱辐射测量的要求。

关键词: 双单色仪; 色散相加; 杂散光; 线色散率; 分辨率

中图分类号: TH744.1

文献标志码: A

Optical Design of Holographic Plane Grating Double Monochromator with the Double Decked Ebert-Fastie Structure

XUE Qing-sheng^{1,2}, WANG Shu-rong¹, LI Fu-tian¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For the need of high-precision spectral radiance measurement, a holographic plane grating double monochromator with the double decked Ebert-Fastie structure is designed. This system consists of two spherical collimating mirrors, a plane mirror, a roof mirror, two holographic plane gratings, entrance slit, exit slit and mid slit. Wavelength region from 160nm to 400nm can be scanned. This double decked design has a compact structure, high spectral resolution and low stray level. Its spectral resolution is less than 0.15nm, and stray level is 10^{-6} , which satisfies the need of high-precision spectral radiance measurement in ultraviolet wavelength region in space.

Key words: double monochromator; adding dispersion; stray light; line dispersion; resolution

1 引言

空间紫外遥感是除可见、红外及微波遥感以外的一个具有突出优势的遥感领域, 在大气物理、环境科学、气象学、目标/背景信息等方面有重要应用, 近年来发展十分迅速^[1-4]。单色仪是进行空间紫外遥感高精度光谱辐射测量的核心仪器, 但它在产生单色光的同时, 也存在程度不同的杂散光。所谓单色仪的杂散

收稿日期: 2007-09-17; 收到修改稿日期: 2008-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40675083)

作者简介: 薛庆生(1979-), 男(汉族), 山东梁山人, 博士研究生, 主要研究方向为空间紫外遥感仪器及光学系统设计。

E-mail: qshxue2006@163.com

光是指出射光束中所需光谱范围以外其他波长的光辐射量,这种不需要的“杂光”辐射混在所需波带的辐射中输出,不但使出射光束的单色性降低,而且形成光谱辐射测量中的背景光,降低信噪比,甚至淹没微弱的有用光辐射信号^[5-7]。一般单色仪的杂散光水平为 10^{-3} ,远远不能满足空间紫外遥感高精度光谱辐射测量的要求,因为太阳和太阳后向散射辐射变化剧烈,要求单色仪的杂散光水平为 10^{-6} 。

双单色仪是减少杂散光的最可靠的办法,为满足空间紫外遥感高精度光谱辐射测量的要求,设计了一种色散相加的 Ebert-Fastie 型双层结构平面全息光栅双单色仪,该系统由球面准直聚光镜、平面和屋脊转向镜、平面全息光栅及入射、出射和中间狭缝组成,扫描波长范围 160~400 nm。具有结构紧凑、色散相加、高光谱分辨率、低杂散光水平等特点,系统的光谱分辨率小于 0.15 nm,杂散光水平为 10^{-6} ,满足空间紫外遥感高精度光谱辐射测量的要求。

2 双单色仪的结构原理

双单色仪是将两个单色仪串接起来使用的仪器,第一个单色仪的出射狭缝通常是第二个单色仪的入射狭缝,由于光线经过两个单色仪两次色散,因此从第二个单色仪出射狭缝射出的单色光光谱质量明显改善。

由于两个单色仪连接的方式不同,它们的色散率、像差、角放大率和杂散光各不相同。根据双单色仪的色散性质,双单色仪一般分为色散相加和色散相减两大类。

根据色散加法原理^[8],可以判断一个双单色仪是色散相加型还是色散相减型。设想在双单色仪入缝 S_1 和出缝 S_3 处各设置一个多色光源。它们将在中间狭缝 S_2 形成两列光谱。如果两列光谱有相同指向,则双单色仪为色散相减型。如果两列光谱具有相反指向,则双单色仪为色散相加型。

设双单色仪的第一及第二个单色仪的线色散率分别为 $(dI/d\lambda)_1$ 和 $(dI/d\lambda)_2$,角色散率分别为 $(d\theta/d\lambda)_1$ 和 $(d\theta/d\lambda)_2$,聚焦物镜的焦距分别为 $(f'_2)_1$ 和 $(f'_2)_2$;角放大率分别为 γ_1 和 γ_2 ,则第一个单色仪的线色散率为

$$\left(\frac{dI}{d\lambda}\right)_1 = (f'_2)_1 \times \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_1 \times \gamma_1 \quad (1)$$

双单色仪的总线色散率为

$$\left(\frac{dI}{d\lambda}\right) = (f'_2)_1 \times \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_1 \times \gamma_1 \times \gamma_2 \pm (f'_2)_2 \times \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_2 \times \gamma_2 \quad (2)$$

当两个单色仪完全相同、且角放大率 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$ 时,色散相加型双单色仪的总线色散率为第一个单色仪线色散率的二倍,即 $(dI/d\lambda)_{\text{加}} = 2(dI/d\lambda)_1$,而色散相减型双单色仪的总线色散率为零,即 $(dI/d\lambda)_{\text{减}} = 0$ 。虽然由两个完全相同的单色仪组成的色散相减的双单色仪在理论上总线色散率为零,但由于两者之间有中间狭缝(兼作第一个单色仪的出射狭缝和第二个单色仪的入射狭缝),它只让很狭窄的光谱范围的 $\Delta\lambda$ 的光进入第二个单色仪,所以第二个单色仪不会把经第一个单色仪分解开的不同波长的光又重新复合起来。因此,色散相减型双单色仪的总线色散率实际上不等于零,而等于第一个单色仪的色散率,即 $(dI/d\lambda)_{\text{减}} = (dI/d\lambda)_1$ 。双单色仪总的理论分辨率和总线色散率相似,对于由两个完全相同的单色仪构成的色散相加的双单色仪而言,总的理论分辨率为一个单色仪理论分辨率的二倍,即 $R_{\text{加}} = 2R_1$,对于色散相减的双单色仪,总的理论分辨率等于一个单色仪的理论分辨率, $R_{\text{减}} = R_1$ 。

在空间紫外遥感高精度光谱辐射测量中,既要求单色仪系统有很高的光谱分辨率,又要求有很低的杂散光水平。根据双单色仪的一般原理,我们选择色散相加的双单色仪设计方案,设计了一种结构紧凑色散相加的 Ebert-Fastie 型双层结构平面全息光栅双单色仪。

3 Ebert-Fastie 光栅双单色仪光学设计

根据空间紫外遥感光谱辐射传输特性的计算及所要达到的光谱分辨率和信噪比,确定了双单色仪光学系统的设计指标如表1所示。根据总体指标要求,决定采用两个相对孔径为 $f/5$,焦距为 250 mm 的 Ebert-Fastie 型单色仪串接成色散相加的光栅双单色仪方案。

3.1 Ebert-Fastie 光栅双单色仪光学系统优化设计

利用光学设计软件 CODEV 对 Ebert-Fastie 光栅双单色仪进行了优设计。图 1 为 Ebert-Fastie 光栅双单色仪光路图。图 2 为入缝点在出缝平面上的点列图。

如图 1 所示, Ebert-Fastie 型双层结构光栅双单色仪由球面准直聚光镜、平面和屋脊转向镜、光栅及入射、出射和中间狭缝组成。为使结构紧凑、色散相加, 亦为使两个单色仪的光栅可以同轴驱动, 在两个单色仪之间采用了屋脊转向镜和平面镜进行光学传递。这种双层结构的特点在于两块完全相同的平面全息光栅安装在同一转轴上做到同轴转动, 不但把机构基本简化为一个单色仪的结构, 而且确保两块光栅同步地进行光谱扫描, 色散相加。球面准直聚光镜, 焦长 250 mm, 通光孔径 76 mm × 135 mm, 熔融石英材料, 镜表面镀 Al + MgF₂ 膜, 160~400 nm 波段镜面光谱反射率高于 80%。屋脊转向镜是由两块平面反射镜胶合而成的直角屋脊反射镜, 屋脊角误差 $\Delta\psi$ 会引起在中间狭缝面上出现间隔为 $4l\Delta\psi/\sqrt{2}$ 的双像, 其中 l 是屋脊镜到中间狭缝的距离, 为 45.5 mm, 若令双像的光谱间隔小于 1/5 光谱分辨率, 则屋脊角的容差应小于 30'。光栅为全息光栅, 刻线密度 2 400 /mm, 刻线面积 52 mm × 52 mm, 闪耀波长在 160 nm, 在工作波段 160 ~ 400 nm 范围内, 光栅效率高于 70%。

表 1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

Wavelength region	160~400 nm
Spectral resolution	0.15 nm
Spectral bandwidth	1.2 nm@300 nm
Stray level	10 ⁻⁶
FNO	5
Focal length	250 mm

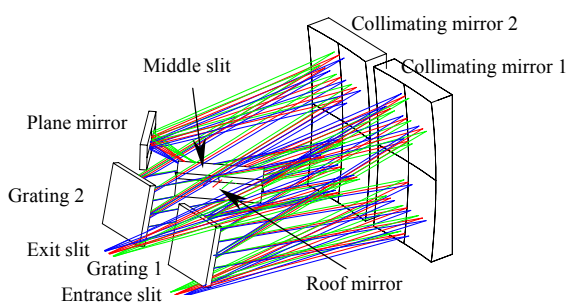


图 1 Ebert-Fastie 光栅双单色仪结构图

Fig.1 Scheme diagram of Ebert-Fastie grating double-monochromator

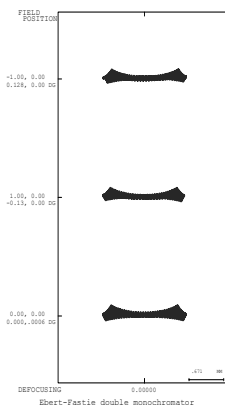


图 2 入缝点在出缝平面上的点列图

Fig.2 Spot diagrams at exit slit

3.2 Ebert-Fastie 光栅双单色仪的光谱分辨率和带宽

单色仪重要技术指标是从出缝输出辐射的光谱带宽 $\Delta\lambda$, 可表示为

$$\Delta\lambda = \sqrt{\Delta\lambda_0^2 + \Delta\lambda_s^2} \quad (3)$$

它由单色仪的固有光谱分辨率 $\Delta\lambda_0$ 和狭缝宽度 L 对应的光谱增宽 $\Delta\lambda_s$ 决定。狭缝宽度取决于要求落到探测器上辐射流的大小和实际使用所要求的光谱分辨宽度。狭缝宽度 L 对应的光谱增宽 $\Delta\lambda_s$ 可表示为

$$\Delta\lambda_s = L \times (d\lambda/dl) \quad (4)$$

式中 $d\lambda/dl$ 为系统线色散的倒数。在光栅常数为 d , 级次为一级, 不同扫描波长 λ 的光按定偏向角 2δ 出射时, 对应的光栅法线转角为

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d \cos \delta}\right) \quad (5)$$

则对第一个单色仪, 入射角 $\alpha = \gamma - \delta$, 衍射角 $\beta = \gamma + \delta$ 。

从而, 该系统的线色散可表示为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \left(\frac{1}{\cos \alpha} + \frac{1}{\cos \beta}\right) \cdot N_0 \cdot f \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

式中 N_0 为每毫米光栅刻线数。由式(4)~式(6)联立求得该双单色仪的线色散和狭缝宽度在 1.2 mm 时对应的光谱带宽 $\Delta\lambda_s$ 如表 2 所示。单色仪的固有光谱分辨率可表为

$$\Delta\lambda_0 = \sqrt{\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_2^2 + \Delta\lambda_3^2 + \Delta\lambda_4^2} \quad (7)$$

其中: $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$, $\Delta\lambda_3$, $\Delta\lambda_4$ 分别代表光栅衍射分辨率、光学系统像差、谱线弯曲和加工误差对光谱分辨率的影响。

表 2 双单色仪的线色散和 1.2 mm 缝宽对应的光谱带宽

Table 2 Line dispersion and spectral bandwidth when slit width is 1.2 mm

λ/nm	160	340	400
γ	11.240 672	24.470 686	29.165 020
α	1.292 914	14.522 926	19.217 262
β	21.188 43	34.418 444	39.112 776
$(d\lambda/d\lambda)/(\text{mm}/\text{nm})$	1.244	1.347	1.409
$(d\lambda/d\lambda)/(\text{nm}/\text{mm})$	0.804	0.742	0.710
$\Delta\lambda_s/\text{nm}$	0.965	0.890	0.852

3.2.1 光栅衍射分辨率对应光谱带宽 $\Delta\lambda_1$

光栅的理想衍射分辨率为 $R_0=2W \times N_0$, 其中 W 是光栅刻线区域的宽度, N_0 是光栅的刻线密度。考虑到光栅缺陷引起分辨率下降, 通常取光栅实际衍射分辨率是理想分辨率的 0.7 倍。这样光栅衍射分辨率对应的光谱带宽为: $\Delta\lambda_1 = \lambda/(0.7R_0)$ 。

3.2.2 光学系统的像差影响 $\Delta\lambda_2$

单色仪光学系统是由球面反射镜、平面光栅构成的 Ebert-Fastie 型, 球差、慧差是主要像差。单球面镜在近轴焦面处的弥散斑直径为 $2TA_y = f/(32FNO^3)$, 当离焦量取 3/4 轴向球差时得最小弥散斑直径为 $2TA_y = f/(128FNO^3)$ 。由于整个双单色仪系统四次经过球面镜反射, 该系统由初级球差产生的弥散斑直径为 $2TA_y = f/(32FNO^3)$, 其中 f 是焦距, 为 250 mm, FNO 是相对孔径倒数, 为 5, 这样求得 $2TA_y=0.0625$ mm。

Ebert-Fastie 单色仪的准直镜和聚光镜符合“N 型”排列, 大部分彗差彼此相消, 残余的子午彗差 $Coma_T$ 和弧矢彗差 $Coma_S$ 为

$$Coma_T = \frac{3W^2}{8r^2}(H_2 \cos^2 \beta - H_1 \cos^2 \alpha) \quad (8)$$

$$Coma_S = \frac{W^2}{8r^2}(H_2 - H_1) \quad (9)$$

式中: W 是光栅刻线面积的宽度, r 是反射镜半径, H_1 、 H_2 分别是入缝和出缝到光轴的距离, α 、 β 分别为入射角和衍射角。将 $W=50$ mm, $r=500$ mm, $H_2=50$ mm, $H_1=36$ mm 以及表 2 中 α 、 β 值代入式(8)和式(9), 并考虑到色散相加的双单色仪的彗差还要加倍, 可以估算彗差。综合考虑初级球差和彗差, 沿狭缝宽度方向的像差弥散, 在 160 nm 处约为 0.14 mm, 对应 $\Delta\lambda_2=0.1$ nm。

3.2.3 谱线弯曲的影响 $\Delta\lambda_3$

对直狭缝, 光栅的谱线弯曲引起的光谱增宽为 $\Delta\lambda_3=(\lambda/8) \times (\eta/f)^2$, 其中 η 是狭缝高度, 在波长 160 nm 处, $\Delta\lambda_3=0.05$ nm, 在波长 400 nm 处, $\Delta\lambda_3=0.125$ nm。把出射狭缝做成弯曲狭缝使与谱线弯曲半径的平均值相匹配。

3.2.4 加工误差的影响 $\Delta\lambda_4$

光学反射面的加工误差—局部光圈取 0.1, 那么 9 个面引起的波差近似为

$$\sqrt{9 \times (\lambda/10)^2} = 0.3\lambda \quad (10)$$

估算加工误差引起的 $\Delta\lambda_4$ 约为 0.02 nm。表 3 列出了单色仪固有特性对光谱分辨率的影响以及缝宽为 1.2 mm 时, 实际光谱带宽 $\Delta\lambda$ 。从设计结果的分析表明, 所设计 Ebert-Fastie 型双层结构光栅双单色仪满足固有光谱分辨率和使用的光谱带宽方面的技术指标。

表 3 单色仪光学系统固有特性对光谱分辨率的影响

Table 3 Effect of inherent characteristics of monochromator optical system on spectral resolution

λ/nm	160	340	400
$\Delta\lambda_1$	0.000 67	0.001 42	0.001 67
$\Delta\lambda_2$	0.11	0.104	0.10
$\Delta\lambda_3$	0.034	0.024	0.040
$\Delta\lambda_4$	0.02	0.02	0.02
$\Delta\lambda_0$	0.117	0.109	0.110
$\Delta\lambda$	0.972	0.897	0.859

4 Ebert-Fastie 光栅双单色仪杂散光抑制措施设计

在所有单色仪的出缝上,除了有需要的光谱辐射外,总会落上一一定数量的寄生辐射,即杂散光。影响单色仪杂散光的因素很多,如由光栅制造缺陷产生的鬼线及散射光;仪器内壁,镜框等多次漫反射引起的光,光学表面蒙上灰尘、污染或表面粗糙度而产生的散射光等。这些杂散光会造成光谱辐射测量精度下降,而空间紫外遥感高精度光谱辐射测量的要求单色仪的杂散光水平达到 10^{-6} ,为此必须采取措施抑制杂散光。

首先,仪器内壁和内部一切非正常通光的零部件、镜框必须进行表面的特殊“发黑”处理。使单个单色仪的杂散光水平达到 10^{-3} 量级。其次,采用全息光栅而不采用机刻光栅。因为光栅刻划机周期性误差造成的光栅缺陷使得在衍射主线两侧对称分布着相等间隔的鬼线,最亮的鬼线强度可达到主线的 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。此外,刻划机的随机振动和刻槽反射面的不完善还会产生散射光。而全息光栅没有鬼象,杂散光比机刻光栅低。最后,将前后两个单色仪系统隔成基本封闭的腔体,用来隔断两个单色仪系统杂散光之间的相互影响,从而抑制整个系统的杂散光。两个单色仪串接时杂光的抑制能力大致复合相乘规律,当单个单色仪的杂散光水平为 10^{-3} 时,则双单色仪的杂散光水平为 $(10^{-3})^2 = 10^{-6}$ 。系统采用双单色仪,比单个单色仪增加了 1 块光栅、2 次球面镜反射、1 个平面反射镜和 1 个屋脊反射镜,反射镜的反射率大于 80%,光栅效率大于 70%,计算可得信号水平将为单个单色仪信号水平的 22.94%。而杂散光水平为单个单色仪杂散光水平的 0.1%,故双单色仪的信噪比是单个单色仪信噪比的 229.4 倍。

5 结 论

本文根据双单色仪的一般结构原理,提出了一种 Ebert-Fastie 型双层结构平面全息光栅双单色仪设计方案,并对其进行了优化设计。对设计结果进行了分析,分析结果表明,所设计的平面全息光栅双单色仪结构紧凑,色散相加,光谱分辨率高,并且有效地抑制了杂散光,提高了信噪比,满足空间紫外遥感高精度光谱辐射测量的要求。

参考文献:

- [1] 王淑荣, 邢进, 李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计 [J]. 光学 精密工程, 2006, **14**(2): 185-190.
WANG Shu-rong, XING Jin, LI Fu-tian. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. **Opt. Precision Eng.**, 2006, **14**(2): 185-190.
- [2] LEITCH J W, RODRIGUEZ J V, DITTMAN M, *et al.* Limb Scatter Ozone Profiling Sensor for the NPOESS Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) [J]. **SPIE**, 2003, **4891**: 13-21.
- [3] NEELE F, SCHLEIJPEN R. Electro-optical missile plume detection [J]. **SPIE**, 2003, **5075**: 270-280.
- [4] DITTMAN, MICHAEL G, JAMES, *et al.* Limb Broad-Band Imaging Spectrometer for the NPOESS Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) [J]. **SPIE**, 2002, **4814**: 120-130.
- [5] 魏祥泉, 李金宗, 李冬冬. 交会对接杂散光分析及反杂光干扰措施设计 [J]. 光电工程, 2006, **33**(5): 21-26.
WEI Xiang-quan, LI Jin-zong, LI Dong-dong. Effects of miscellaneous lights in space rendezvous measures to suppress the interference of and docking and the design of miscellaneous lights [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, **33**(5): 21-26.
- [6] 黄智强, 邢延文. 遮光罩和挡光环程序化设计的原理及实现 [J]. 光电工程, 2006, **33**(4): 119-123.
HUANG Zhi-qiang, XING Yan-wen. Principle and realization of baffle and vane's programmable design [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, **33**(4): 119-123.
- [7] 杨锐, 苏毅. 卡塞格伦望远镜系统杂散光分析 [J]. 光电工程, 2003, **30**(5): 48-65.
YANG Rui, SU Yi. Analysis for Stray Light of a Cassegrain Telescope [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2003, **30**(5): 48-65.
- [8] MURTY M V R K. Theory and principles of monochromators [J]. **Spectrometers and spectrographs Optical Engineering**, 1974, **13**(1): 23-29.