

doi: 10.3788/gzxb20124107.0776

太阳极紫外成像光谱仪光学系统设计与分析

刘壮^{1,2}, 巩岩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 100049)

摘 要:针对太阳极紫外成像光谱仪的应用目的与工作环境,设计了一种太阳极紫外成像光谱仪的光学系统.该系统由望远系统、狭缝、光栅与探测器组成.望远系统采用离轴 Wolter II 型结构,入射光掠入射进入系统,具有光谱范围宽、稳定性高、克服恶劣空间环境能力强等优点.扫描镜采用平面反射镜,成像质量不随扫描角的变化而改变.分光光栅采用超环面 3 600 lines/mm 变间距光栅,与超环面等间距光栅相比,具有成像质量高、光谱分辨率高、缩短系统长度的优势.工作波段为 17.0~21.0 nm,可满足探索温度在 $5.8 \leq \log T \leq 6.3$ 区间的宁静日冕的需要.视场为 $1\ 228'' \times 2\ 400''$,空间分辨率达到 0.8 arc second/pixel,光谱分辨率约为 0.001 98 nm/pixel,总长度不超过 2.5 m.计算了望远系统的理论有效面积,给出了望远系统的成像质量与实际的视场.系统整体的成像质量、光栅的谱线弯曲与谱带弯曲,均满足实际应用要求.

关键词:光学设计;成像光谱仪;极紫外;Wolter II 型结构;超环面变间距光栅

中图分类号:O434

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)07-0776-5

0 引言

太阳大气的剧烈活动是空间灾害性天气产生的基本根源.在极紫外波段对太阳进行超光谱观测是分析太阳大气活动起源与发展过程的重要手段,可为空间天气的研究提供重要资料.太阳极紫外成像光谱仪已成为观测太阳活动,预测空间天气最重要的工具之一.

1971 年 9 月至今,人类共 10 次发射载有具有空间分辨能力的太阳极紫外成像光谱仪.其中,最具有代表性的成像光谱仪有 SOHO 卫星所搭载的 CDS(Coronal Diagnostic Spectrometer),俄罗斯与乌克兰联合发射的 CORONAS-PHOTON 卫星的 EUSH(Extreme Ultraviolet Spectroheliometer)与 Solar-B 卫星所搭载的 EIS(Extreme Imaging Spectrometer).美航局与欧空局计划于 2015 年发射的 Solar Orbiter 卫星,EUS(Extreme Ultraviolet Spectrometer)将是其重要的设备之一^[1-4].

理想的太阳极紫外成像光谱仪不仅要具备高空间分辨率、高光谱分辨率、大视场与高灵敏度等优点,同时由于极紫外观测只能在地球大气层外进行,

还要求太阳极紫外成像光谱仪具有尽可能紧凑的结构、小的质量与克服恶劣空间环境的能力^[5].

本文设计的太阳极紫外成像光谱仪望远系统采用 Wolter II 型结构,在焦距相同的情况下,比常用的离轴抛物面结构更短、稳定性更高、克服恶劣空间环境的能力更强.分光系统采用超环面变间距光栅,在相同条件下,它比超环面等间距光栅可采用更大的放大率,进而可缩短系统整体长度.

1 光学系统设计

1.1 性能指标

结合目前国外太阳极紫外成像光谱仪(Solar Extreme-Ultraviolet Imaging Spectrometer, SEIS)的现状与国内光学零件的加工水平,制定了光学系统的主要性能指标.工作波段选择 17.0~21.0 nm,这一波段包含了 Fe IX-XIV 的极强的辐射线,是探索温度在 $5.8 \leq \log T \leq 6.3$ 区间的宁静日冕内物理活动的极好选择.其它参量与已应用的最先进的 EIS 比较结果如表 1 所示,从中可以看出,设计在视场、空间分辨率、光谱分辨率、系统总长度上均优于 EIS.

基金项目:国家自然科学基金(No. 40974110)资助

第一作者:刘壮(1986—),男,博士研究生,主要研究方向为光学系统设计和成像光谱技术. Email: Zhuangzhilingyun2007@yahoo.com.cn

导师:巩岩(1968—),男,研究员,主要研究方向为光学系统设计和成像光谱技术. Email: yong2000@sina.com

收稿日期:2011-11-25;修回日期:2012-01-19

表 1 与 EIS 性能参量比较

Table 1 Performance parameters comparison with EIS

Imaging spectrometer	SEIS	EIS
Field of view	1 228"×2 400"	512"×480"
Spatial resolution/ (arc second·pixel ⁻¹)	0.8	1.0
Spectral resolution/ (nm·pixel ⁻¹)	≈0.002 0	≈0.002 2
Total length/m	<2.5	≈3.0

1.2 结构特点

望远系统为离轴 Wolter II 型结构,它包含两个反射镜,前一个反射镜(M₁)为抛物面,另一个反射镜(M₂)为双曲面.反射发生在抛物面的内表面和双曲面的外表面,增大两个反射镜的偏心量使入射光掠入射到反射镜上.两个反射镜的焦点重合可得到无象散的大视场.Wolter II 型结构的等效焦距大于实际系统长度,从而在获得相同空间分辨率的情况下降低了望远系统的长度.抛物面反射镜前设置一个掠入射平面反射镜用以实现扫描,由于平面反射镜可以完善成像,采用这种扫描方式后,系统成像质量不随扫描角度的变化而变化.望远系统优化时要将光线入射到每个反射镜的掠入射角范围控制在约(7~15)°之间,以增大反射镜的反射率,提高望远系统有效面积.反射镜的表面沉积金膜,相较于正入射时沉积的多层周期膜稳定性更高,更适用于极端恶劣的空间环境.将前置扫描反射镜入射角设置在80°,扫描角设在±1 200 arc second 之间,这个角度范围可以使其在太阳同步轨道上实现全日面的扫描^[4,6].

超环面变间距光栅超环面的面型具有消除部分象散的能力,其变化的间距又可消除一部分像差,从而具有较高的成像质量.或者获得的成像质量相同时,相对于超环面等间距光栅,超环面变间距光栅可采用更大的放大率,进而缩小系统整体长度.其分光方向间距的表达式为

$$d(y) = d_0 + d_1 \cdot y + d_2 \cdot y^2 + d_3 \cdot y^3 \quad (1)$$

式中: y 平行于分光方向; d_0 为 y 坐标原点光栅间距,文中使用线密度为 3 600 lines/mm 的光栅,此时 $d_0 \approx 277.778$ nm; d_1 、 d_2 、 d_3 为间距系数.衍射级次为+1 级.

探测器选用已制造出的背照射超薄 APS-CMOS,阵列规模为 4 096×3 072,像元尺寸:5×5 μm²,2×2 个像元合并使用,17.0~21.0 nm 波段量子效率不低于 30%^[7].

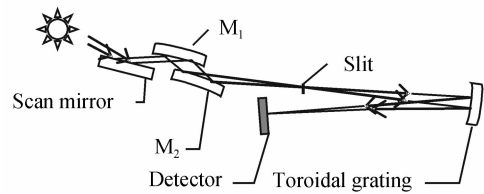


图 1 太阳极紫外成像光谱仪光学系统结构图

Fig. 1 Optical system layout of solar EUV imaging spectrometer

1.3 光学系统设计

将该结构在光学设计软件 CODE V 中建模、优化,所得具体结构参量如表 2.

表 2 优化后的结构参量

Table 2 Detailed configuration parameters after optimization

Entrance aperture	68 mm	Telescope EFL	1 598.55 mm
M ₁ radius	75.002 mm	M ₂ radius	30.876 mm
M ₁ to M ₂ distance	22.425 mm	M ₂ to slit distance	636.474 mm
M ₁ decenter	279.910 mm	M ₂ conic constant	-1.099
Plate scales	7.75 μm/ arc sec	Slit size/μm ²	6.2×9 523
Grating incidence angle	5.268°	Grating entrance arm	868.00 mm
Grating exit arm	1 400.00 mm	d ₁	-2.667 7e-005
d ₂	-2.886 2e-007	d ₃	1.766 4e-010
Grating radius	1 067.352 9 mm	Grating radius of rotating	1 074.375 1 mm
Spectral resolution	0.001 98 nm/ pixel	Spatial resolution	0.8"×1 228"

2 光学系统分析

2.1 望远系统有效面积的计算

望远系统的有效面积为望远系统的入射光瞳的面积与望远镜反射率的乘积,主要用于计算系统接收到的能量.反射镜的表面沉积金膜.在掠入射情况下,金膜的反射率随着入射角的变化而变化.在视场为(0°,0°)时,望远系统的有效面积可表示为

$$A_{\text{eff}}(\lambda) = \int_{-R}^R \int_{y_0 - (R^2 - x^2)^{1/2}}^{y_0 + (R^2 - x^2)^{1/2}} R_p^1(x, y, \lambda) R_p^2(x, y, \lambda) \cdot R_p^3(x, y, \lambda) dy dx + \int_{-R}^R \int_{y_0 - (R^2 - x^2)^{1/2}}^{y_0 + (R^2 - x^2)^{1/2}} R_s^1(x, y, \lambda) \cdot R_s^2(x, y, \lambda) \cdot R_s^3(x, y, \lambda) dy dx \quad (2)$$

式中: $R_p^1(x, y, \lambda)$ 、 $R_p^2(x, y, \lambda)$ 、 $R_p^3(x, y, \lambda)$ 、

$R_p^1(x, y, \lambda)$ 、 $R_s^2(x, y, \lambda)$ 、 $R_s^3(x, y, \lambda)$ 分别为波长为 λ 的平行光经入瞳 (x, y) 点进入系统后, 对应的平面反射镜、抛物面反射镜与双曲面反射镜的 p 偏振光与 s 偏振光的反射率; y_0 为离轴量; R 为入瞳半径.

由菲涅耳公式得到的反射率公式为

$$R_p = \left[\frac{n_1 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta_1} - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta_1} + n_2 \cos \theta_1} \right]^2$$

$$R_s = \left[\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta_1}} \right]^2 \quad (3)$$

可知 p 偏振光与 s 偏振光反射率与金膜折射率 n_2 , 入射角 θ_1 之间的关系 ($n_1 = 1$); 通过查询折射率数据库或实际测试可得出不同入射波长对应的金膜折射率 n_2 ; 入射角 θ_1 与点 (x, y) 的关系则可通过望远系统几何关系的推算得到^[8]. 最终计算出不同波长对应的准确有效面积如图 2 (金膜折射率由折射率数据库得到). 本设计扫描角在 $\pm 1\ 200$ arc second 以内, 经计算在工作波段内对应平面反射镜 p 偏振光与 s 偏振光的反射率 $R_p^1(x, y, \lambda)$ 、 $R_s^2(x, y, \lambda)$ 、 $A_{eff}(\lambda)$ 的最大变化不超过均值的 5%.

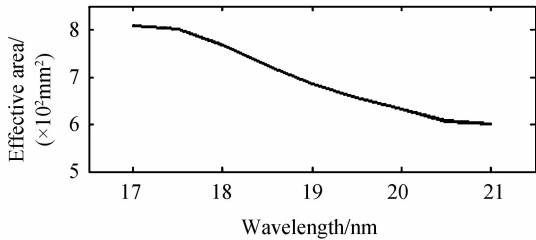


图 2 不同波长对应的望远系统有效面积
Fig. 2 Telescope system's effective area versus wavelength

2.2 望远系统成像质量

Wolter II 型结构仍具有传统卡塞格林结构的性质, 即具有很难矫正的场曲. 场曲的存在导致成像质量随着视场的增大而降低. 图 3 为望远系统的像斑均方根半径随视场的变化曲线. 同时直线视场经过系统后会变弯曲, 无法全部通过狭缝, 最终能通过狭缝的物视场实际是略微弯曲的. 图 4 表示了

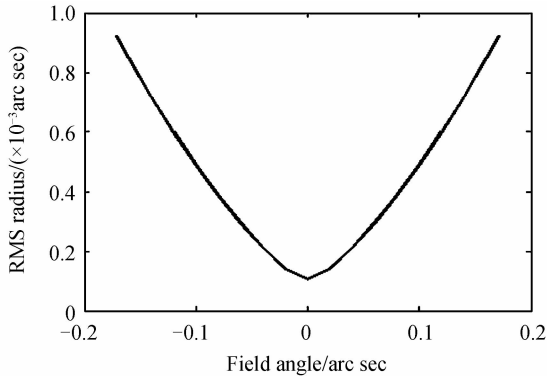


图 3 望远系统的像斑均方根半径随视场的变化曲线
Fig. 3 RMS radius of telescope system versus wavelength

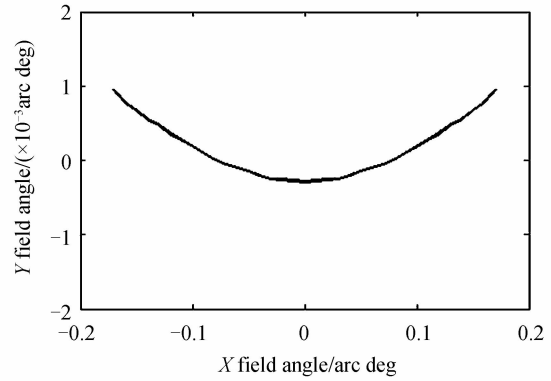


图 4 能通过狭缝的真实的视场曲线
Fig. 4 Real field curve

真实的视场. 由于本设计采用前置平面反射镜旋转的方式扫描, 每次成像的视场形状不变, 在处理图像时, 可采用坐标转移的方法复原图像, 但该方法存在误差, 最大误差为二分之一像元, 即空间角 0.2 arc second^[9].

2.3 系统整体成像质量

系统经优化后在波长为 18 nm 附近成像质量最差. 图 5 为系统在 18 nm 处的点列图, 其在视场为 $(0^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0.12^\circ, 0^\circ)$ 、 $(-0.12^\circ, 0^\circ)$ 、 $(0.170\ 7^\circ, 0^\circ)$ 、 $(-0.170\ 7^\circ, 0^\circ)$ 处的 RMS 直径分别为 8.510 mm、 6.623 mm、 6.623 mm、 9.910 mm、 9.910 mm, 均小于像元尺寸; 图 6 为波长 18 nm 处传递调制函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线, 其在特征频率范围内大于 0.5 , 所以设计满足应用要求.

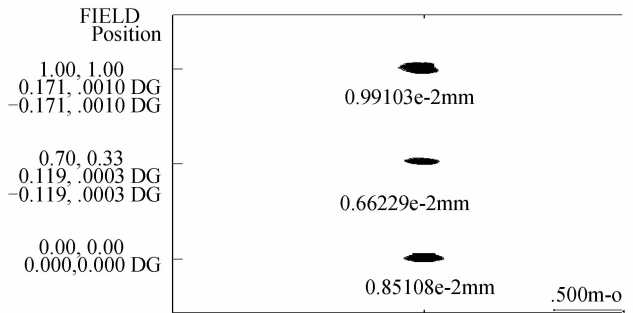


图 5 波长 18 nm 的 RMS 半径
Fig. 5 RMS radius in 18 nm

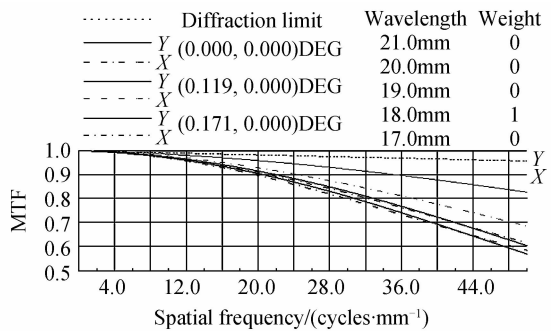


图 6 系统波长 18.0 nm 处的 MTF 曲线
Fig. 6 System's MTF curve in 18.0 nm

2.4 分光系统的谱线弯曲及谱带弯曲

谱线弯曲是指狭缝的不同波长弯曲图像与直线的偏离程度,一般以偏差与狭缝像高的比值来表示;谱带弯曲(也叫色畸变)是由光谱成像系统对狭缝不同波长的像放大率不同引起的,一般以不同波长的畸变值相对于整个波长范围的平均畸变值来衡量.太阳极紫外成像光谱仪的空间和光谱一致性是一项非常重要的性能指标,为了获得准确的超光谱数据,谱带弯曲和谱线弯曲这两种畸变必须控制在 20% 像元内.图 7 为谱线弯曲,图 8 为谱带弯曲图,由二图可以看出这两种畸变均未超过像元的 20%^[10].

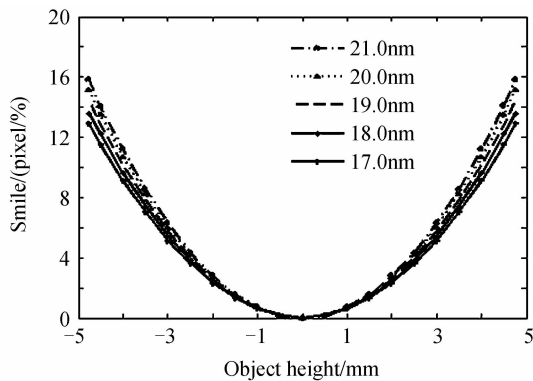


图 7 不同波长的谱线弯曲

Fig. 7 Total smiles for different wavelength

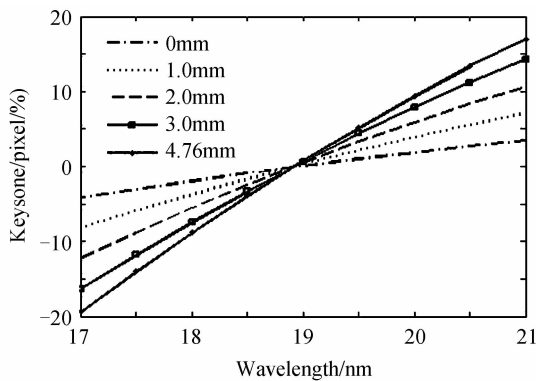


图 8 不同物高的谱带弯曲

Fig. 8 Keystones for different object heights

3 结论

本文针对太阳极紫外成像光谱仪的特殊应用要求提出了一种光学系统设计方案.该方案的望远系

统采用离轴 Wolter II 型结构,分光系统采用超平面变间距光栅.该方案具有视场大、空间分辨率与光谱分辨率高、总长度短、光谱范围宽、稳定性高以及克服恶劣空间环境能力强等优点.利用光学设计软件 CODE V 进行了设计与模拟分析.计算了望远系统的有效面积,给出了望远系统的成像质量随视场的变化与实际可通过狭缝的视场.模拟分析结果表明:系统整体的成像质量、光栅的谱线弯曲与谱带弯曲均满足应用要求.

参考文献

- [1] HARRISON R A, SAWYER E C, CARTER M K, *et al.* The coronal diagnostic spectrometer for the solar and heliospheric observatory[J]. *Solar Physics*, 1995, **162**(1-2): 233-290.
- [2] CULHANE J L, HARRA L K, JAMES A M, *et al.* The EUV imaging spectrometer for hinode[J]. *Solar Physics*, 2007, **243**(1): 19-61.
- [3] KUZIN S V, BOGACHEV S A, ZHITNIK I A, *et al.* TESIS experiment on EUV imaging spectroscopy of the sun[J]. *Advances in Space Research*, 2009, **43**(6): 1001-1006.
- [4] HARRISON R A. EUV spectroscopy for solar orbiter[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **36**(8): 1415-1421.
- [5] THOMAS R J. Elliptical varied line-space (EVLS) gratings [C]. *SPIE*, 2004, **5488**: 755-762.
- [6] POLETO L, GASPAROTTO A, TONDELLO G, *et al.* Design of the extreme-ultraviolet spectrometer for imaging spectroscopy on the "solar orbiter" mission[C]. *SPIE*, 2004, **5488**: 898-909.
- [7] PRYDDERCH M, WALTHAM N, MORRISSEY Q, *et al.* A large area CMOS monolithic active pixel sensor for extreme ultra violet spectroscopy and imaging[C]. *SPIE*, 2004, **5301**: 175-185.
- [8] KOTHA A, HARVEY J E. Enhanced EUV performance of wolter type II telescopes[C]. *SPIE*, 1994, **2011**: 34-46.
- [9] FAN Yong, ZHANG Jia-cheng, CHEN Nian-nian, *et al.* New method for image geometric distortion correction [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, **45**(29): 194-197.
- [10] 范勇,张佳成,陈念年,等.图像几何畸变校正方法[J]. *计算机工程与应用*, 2009, **45**(29): 194-197.
- [10] CHENG Xin, HONG Yong-feng, ZHANG Bao, *et al.* Design of compact Offner hyperspectral imaging system with Féry prism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1773-1780.
- 程欣,洪永丰,张葆,等.插入 Féry 棱镜的小型 Offner 超光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1773-1780.

Design and Analysis of Optical System for Solar Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer

LIU Zhuang^{1,2}, GONG Yan¹

(1 *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A kind of optical system of solar extreme ultraviolet imaging spectrometer is designed aiming at solar extreme ultraviolet imaging spectrometer's application objective and working environment. The optical system consists of a telescope, a scanning mirror, a slit, a grating and a detector. Wolter type II configuration is chosen for the telescope, light enter the system by grazing incident, so it has wide working band, and is highly stable, practicable to withstand the rigors of space-flight. A plane mirror is chosen for scanning mirror, so the imaging quality would not change with scanning angle. A toroidal varied-line-space grating which is 3 600 lines/mm is chosen for dispersion. Compared with toroidal uniform-line-space grating, it superiors in imaging quality, spectral resolution and shortening system length. The working band of the optical system is 17.0 ~ 21.0 nm which could meet the probe of the quiet corona in the temperature region $5.8 \leq \log T \leq 6.3$. The field of view is $1228'' \times 0.8''$, the spatial resolution is 0.8 arc sec/pixel, the spectral resolution is about 0.001 98 nm/pixel, the total length is under 2.5 m. The telescope system's effective area is calculated, and the telescope's imaging quality and real field of view are given. The imaging quality of whole system, the smile and keystone of grating can satisfy the application demand.

Key words: Optical design; Imaging spectrometer; EUV; Wolter type II configuration; Toroidal varied-line-space grating