

文章编号: 0253-2239(2009)09-2590-04

FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪

王淑荣¹ 李福田¹ 宋克非¹ 王立朋¹ 汪龙祺¹ 林冠宇¹ 黄煜¹ 黄福祥² 王维和²

(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, 吉林 长春 130033)
² 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 研制成 FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪, 于 2008 年 5 月发射。它是一台小型化、高精度、紫外-真空紫外光谱辐射计, 用于测量大气太阳后向散射光谱辐亮度和太阳光谱辐照度, 通过数据反演得到大气臭氧总量的垂直分布。在轨道高度 830 km 处获得 160~400 nm 太阳连续光谱和 250~340 nm 间 12 个特征波长的太阳分光光谱及太阳后向散射谱, 在轨测试结果表明: FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪全部功能正常, 性能稳定。

关键词 探测器; 紫外; 真空紫外; 太阳光谱; 臭氧

中图分类号 TP73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2590

Ultraviolet Ozone Vertical Profile Probe for FY-3A Meteorological Satellite

Wang Shurong¹ Li Futian¹ Song Kefei¹ Wang Lipeng¹ Wang Longqi¹ Lin Guanyu¹
Huang Yu¹ Huang Fuxiang² Wang Weihe²

(¹ National Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² National Satellite Meteorologic Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Ultraviolet ozone vertical profile probe for FY-3A meteorologic satellite was developed and launched successfully in May 2008. It is a compact, high-precision, ultraviolet-vacuum ultraviolet spectroradiometer used to measure atmospheric solar backscattering spectral radiance and solar spectral irradiance. The solar spectral irradiance at altitude 830 km in 160~400 nm and the backscatterion solar spectral radiance in the ultraviolet ozone absorption band at 12 wavelengths from 250 nm to 340 nm are obtained. Test results on orbit show that all the function is carried out successfully and the performance is stable.

Key words detectors; ultraviolet; vacuum ultraviolet; solar spectrum; ozone

1 引 言

近二三十年来随着科学技术的进步, 大气探测和研究十分活跃。特别是由于相比地基观测, 卫星遥感具有高的空间覆盖率、时间的连续性和任务多样性而具有不可替代的优势, 因而成为获得全球中层大气状况的主要手段。臭氧作为平流层和中间层最活跃的光化学成份, 通过吸收太阳辐射和光化学反应决定着中层大气的热结构, 从而影响到平流层和中间层的动力学结构。而 20 世纪 80 年代以来发现的南极春季臭氧洞和北半球中纬臭氧总量持续减少的严重趋势, 成为全球环境的重大问题。由于自然变化和人类活动影响的高度复杂性, 围绕臭氧的

研究一直都是国际研究的热点和前沿。

利用紫外散射辐射从空间探测研究大气臭氧层已有近 30 年的历史, 臭氧总量绘图谱仪(TOMS)从 1978 年起提供全球臭氧的长期分布变化, 太阳后向散射紫外谱仪(SBUV)则提供臭氧的垂直分布^[1]。这些仪器对研究全球臭氧环境变化、发现与监测南极春季臭氧空洞和北半球中纬臭氧总量持续减少起着十分关键的作用, 目前这项工作一直在继续^[2,3]。20 世纪 90 年代中后期欧空局(ESA)也研制了与 TOMS/SBUV 相类似的载于欧洲遥感卫星(ERS-2)的全球臭氧监测试验仪器(OMI), 并进行了相关的探测和研究^[4]。

收稿日期: 2008-11-27; 收到修改稿日期: 2009-03-06

作者简介: 王淑荣(1961—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学检测, 紫外辐射计量测试及空间紫外光谱遥感技术研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn(中国光学学会会员号: 1300151)

本世纪初开始研制的紫外臭氧垂直探测仪,是我国风云三号气象卫星上的遥感仪器之一,其主要任务是测量太阳和大气后向散射紫外光谱,反演臭氧总量的垂直分布,为环境监测、气候预报和全球气候变化研究提供重要参数。FY-3A 气象卫星于 2008 年 5 月 27 日发射,2008 年 6 月 4 日紫外臭氧垂直探测仪加电投入在轨运行及探测。

2 系统组成及工作原理

FY-3A 紫外臭氧垂直探测仪如图 1 所示,由探测头部和电箱组成。它是一台能在 160~400 nm 波段测量绝对光谱辐亮度和绝对光谱辐照度的扫描式光谱仪器,主要工作模式及功能有:

- 1) 太阳模式:160~400 nm 波段太阳连续光谱辐照度测量及 250~340 nm 间 12 个特征波长处太阳分立光谱辐照度测量;
 - 2) 大气模式:250~340 nm 间 12 个特征波长处地球大气太阳后向散射紫外光谱辐亮度测量;
 - 3) 标准灯模式:汞灯 253.7 nm 光谱线测量,用于仪器自身波长定标,两块漫反射器分别进行。
- 太阳光谱辐照度测量用于监测漫反射器漫反射率的变化。由 1)和 2)数据反演得到臭氧垂直分布。



图 1 紫外臭氧垂直探测仪

Fig. 1 Ultraviolet ozone vertical profile probe

紫外臭氧垂直探测仪功能上有如下特点:采用双光栅单色仪并配合相应措施,光谱杂光小于 10^{-6} ;电子学系统采用数字同步累加解调技术,在 252 nm 处光谱辐亮度灵敏度优于 $4.95 \times 10^{-6} \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$;采用双漫反射器机构,修正其空间环境下双向反射率(BRDF)变化,保证仪器寿命期间太阳光谱辐照度响应度稳定;采用双探测器,修正探测器灵敏度变化,且互为备份,提高可靠性;采用步进电机-齿轮组-凸轮-摆杆组成的波长扫描机构和霍耳元件定位机构,易于防冷焊处理,保证波长重复性优于 $\pm 0.02 \text{ nm}$,精度优于 $\pm 0.05 \text{ nm}$;利用星上汞灯定标单元,进行波长定标与修正,并监测漫

反射器变化。

紫外臭氧垂直探测仪光学系统由定标光源、漫反射器、消偏器、调制器、Ebert-Fastie 光栅双单色仪、云层光度计及探测器组成。其中决定仪器性能指标的主要为光栅双单色仪和云层光度计。

Ebert-Fastie 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,结构和光路如图 2 所示。为使结构紧凑、色散相加,亦为使两个单色仪的光栅可同轴驱动,在两个单色仪之间采用了屋脊反射镜和平面镜进行光学传递。单色仪球面准直-聚光镜焦长 250 mm,视场角 $11.3^\circ \times 11.3^\circ$,镜表面镀 $\text{Al} + \text{MgF}_2$ 膜,160~400 nm 波段镜面光谱反射率高于 80%。光栅刻线面积 $52 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$,刻线密度 2400 l/mm,表面镀 $\text{Al} + \text{MgF}_2$ 膜,210 nm 处光栅效率高于 30%,工作波段 160~400 nm。

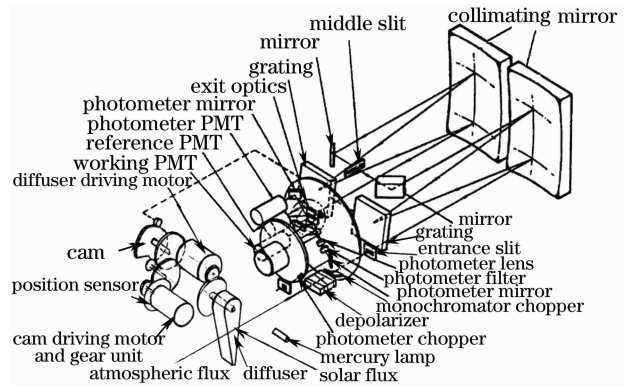


图 2 紫外臭氧垂直探测仪光学系统图

Fig. 2 Optical system layout of ultraviolet ozone vertical profile probe

表 1 给出该光栅双单色仪 1.2 mm 缝宽所对应的的光谱带宽、单色仪光学系统固有特性对光谱分辨率的影响及实际输出的光谱带宽。由表列数据可以看出,像差、谱线弯曲及加工误差引起光谱分辨率损失 0.1 nm,当入缝和出缝宽度取为 1.2 mm 时光谱宽度约为 1.0 nm。臭氧垂直探测仪中采取了一系列措施减少光谱杂光,测试表明光谱杂光小于 10^{-6} 。

表 1 单色仪光谱带宽

Table 1 The spectral bandwidth of the monochromator

λ/nm	120	160	340	400
$\Delta\lambda_a$ at 1.2 mm slit width	0.974	0.965	0.890	0.852
Inherent $\Delta\lambda_o/\text{nm}$	0.121	0.117	0.109	0.110
Actual $\Delta\lambda/\text{nm}$	0.981	0.972	0.897	0.859

用来监测云层覆盖情况的云层光度计由光学调制器、光栏、石英透镜、滤光片、光电倍增管探测器及静电计放大器六部分组成,视场角 $11.3^\circ \times 11.3^\circ$ 。入射光经调制器后,经视场光栏,经石英三透镜系统,中间经滤光片,最后由光电倍增管接收。滤光片中心波长 379 nm,带宽 3 nm。

由于辐照和疲劳等原因光电倍增管增益将产生漂移。在光栅双单色仪出缝处利用反射型分束器将光流分为两部分,一部分引入主光路探测器,另一部分引入参考探测器,以修正光电倍增管增益的变化。

探测器的光电倍增管共三只,一只用于光度计,一只用于单色仪主光路,一支用于单色仪参考光路。双碱光阴极,光阴极有效直径 25.4 mm,端窗,窗口材料为兰宝石,外形尺寸 $\Phi 35 \text{ mm} \times 108 \text{ mm}$,重 140 g。

紫外臭氧垂直探测仪活动部件包括波长扫描机构、双漫反射器转动及换位机构和调制器机构。波长扫描机构和双漫反射器机构均由步进电机驱动。三年寿命期间,漫反射器步进电机约转 $3.2 \times 10^6 \text{ r}$,波长扫描步进电机约转 $2.5 \times 10^7 \text{ r}$ 。对波长扫描机构和双漫反射器转换机构中的轴承、齿轮、凸轮和滚轮进行了防冷焊处理,防冷焊膜层耐磨、抗冲击并有一定的润滑作用。

步进电机经速比 1:33 的齿轮传动系统转动凸轮,凸轮推动与光栅相联的摆杆进而转动光栅,实现波长扫描。用两组霍尔元件确定波长起始位置,定位精度为 0.01 nm。为减小温度的影响,选择凸轮、摆杆与壳体材料线膨胀系数相匹配。计算表明当温度从 -10°C 变化到 $+40^\circ \text{C}$ 时波长扫描精度误差小于 0.02 nm。

无刷直流电机驱动大小两片调制扇,构成调制器机构。电机转速 1500 r/min,三年计 $2.4 \times 10^9 \text{ r}$ 。采用油润滑方式,上海微机电研究所完成无刷直流电机研制,长春光学精密机械与物理研究所完成油密封和润滑机械结构与装配。

紫外臭氧垂直探测仪电控系统由调制器锁相稳速驱动器、3 路静电计放大器、3 路光电倍增管高压电源、3 路多通道数据采集器、2 路步进电机驱动器、汞灯稳流源、单片机控制单元、星上通讯接口单元及二次电源组成。

电子学系统的最小量化信号到满量程最大信号中间应有 10^6 量级的动态范围,静电计放大器承担 4 个数量级,另外 2 个数量级通过改变光电倍增管高压来实现。

电控系统可实现 3 个通道信号的同步并行测

量,该操作及其控制是由单片机控制单元组织完成的。为保证测量的同步,需由单片机控制单元给出统一的启停信号及清零信号,同时由单片机控制单元完成 3 个通道信号的动态实时测量及贮存。通过 1553B 接口完成与卫星数管系统的通讯,以“数据注入”方式接受数管系统的各种控制,以“科学数据包”的形式下传测量数据。

3 测量结果和数据处理

2008 年 6 月 4 日 FY-3A 紫外臭氧垂直探测仪开机,经历了 3 个多月的在轨测试,全部功能均响应并工作正常。包括每天 1 次太阳、每轨 48 次大气、每 7 天 1 次太阳分立谱、每月 1 次的标准灯。

在轨测试期间,分别以太阳和汞灯为光源,对整机性能进行测试评估。

在轨测试太阳光谱例见图 3 和图 4。图 3 表明太阳连续光谱测量模式响应正常,160~400 nm 光谱波段正确;图 4 给出 2008 年 7 月 17 日太阳辐照度离散谱观测数据及其与美国 SOLSTICE 和 SIM 2008 年 6 月 1 日观测值的比较情况^[5],一致性在 $\pm 5\%$ 以内。

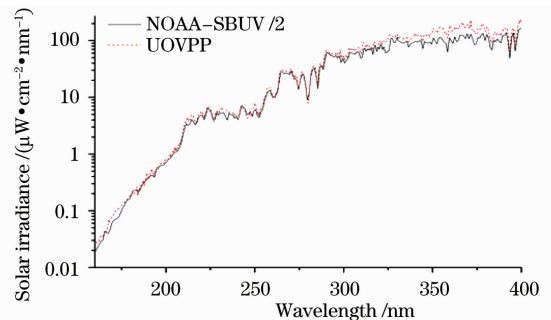


图 3 在轨太阳辐照度连续光谱图例

Fig. 3 Spectrum of the solar spectral irradiance measured on orbit

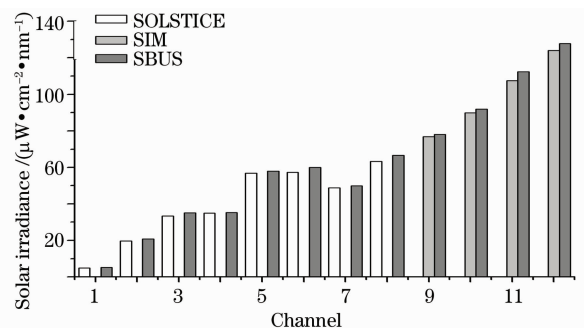


图 4 12 个特征波长太阳辐照度观测数据与 SOLSTICE 和 SIM 比较

Fig. 4 Comparison of the discrete solar spectral irradiance measured at 12 wavelengths with SOLSTICE and SIM

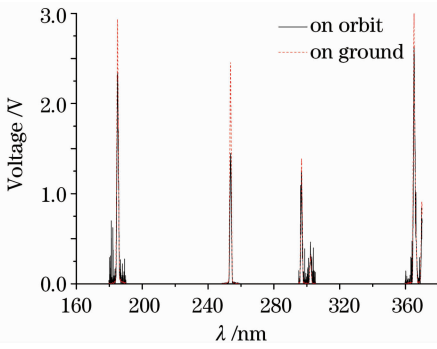


图 5 地面整星热真空试验与在轨汞灯光谱比对

Fig. 5 Comparison of Hg spectrum in easured on orbit with the Hg spectrum measured on surface during Fr-3A satellite thermo-vacuum experiment

在轨测试汞灯光谱例见图 5 和图 6。图 5 给出紫外臭氧垂直探测仪汞灯光谱在轨测试和地面整星热真空试验测试比对结果，一致性在±0.035 nm 以内。图 6 给出真空环境下汞灯 253.728 nm 标准波长与紫外臭氧垂直探测仪测试波长比对结果，表明

紫外臭氧垂直探测仪波长精度为 0.002 nm，满足设计指标要求。

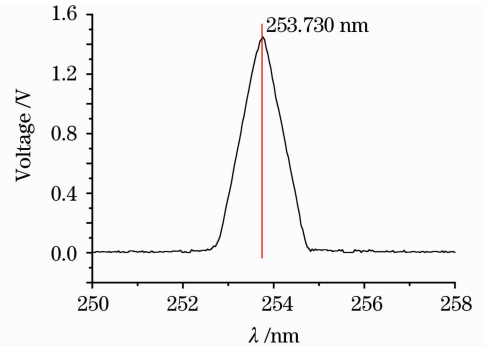


图 6 汞灯 253.728 nm 波长在轨实测谱图

Fig. 6 Hg 253.728 nm spectrum on orbit

在轨测试时，以太阳为光源，以 6 月 11 日至 7 月 2 日期间太阳辐照度分立光谱在轨测量值为例，给出均值、标准差及相对偏差，最大相对偏差 1.2%，见表 2。测量结果表明仪器稳定性满足使用要求。

表 2 在轨太阳辐照度分立光谱测量数据

Table 2 The data of the solar discrete spectral irradiance on orbit

Wavelength /nm	Measured value of spectral irradiance /($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)				AVE	RMS	Relative RMS /%
	080611	080618	080625	080702			
252.00	5.20	5.20	5.10	5.10	5.15	0.06	1.1
273.62	21.00	20.70	20.60	20.60	20.73	0.19	0.9
283.10	35.70	35.10	34.80	34.80	35.10	0.42	1.2
287.70	35.70	35.20	35.10	35.00	35.25	0.31	0.9
292.29	58.30	57.60	57.60	58.20	57.93	0.38	0.7
297.59	60.90	59.70	60.00	59.60	60.05	0.59	1.0
301.97	50.30	49.70	49.70	49.70	49.85	0.30	0.6
305.87	67.10	66.40	66.50	66.60	66.65	0.31	0.5
312.57	79.00	77.70	77.90	77.80	78.10	0.61	0.8
317.56	92.60	91.80	91.50	91.70	91.90	0.48	0.5
331.26	114.30	111.60	112.00	111.30	112.30	1.36	1.2
339.89	129.70	126.60	127.70	127.00	127.75	1.38	1.1

4 结 论

FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪在轨获得 160~400 nm 太阳连续光谱,250~340 nm 间 12 个特征波长及 379 nm 的太阳分立光谱和太阳后向散射谱,以及汞灯光谱。测试结果表明:FY-3A 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪全部功能正常,仪器性能稳定,满足设计指标要求。

参 考 文 献

1 D. F. Heath, A. J. Krueger, H. A. Roeder *et al.*. The solar

backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus G[J]. *Optical Engineering*, 1975, **14**: 323~331

2 H. Weiss, R. P. Cebula, K. Laamann *et al.*. Evaluation of the NOAA-11 backscatter ultraviolet radiometer, mod (SBUV/2): inflight calibration[C]. *SPIE*, 1991, **1493**: 80~90

3 Wei Zongying, Kevin. W. Kelly. BRDF Measurement and calibration for SBUV/2 radiance calibration test tiffuser [C]. *SPIE*, 2004, **5542**: 311~3223

4 S. P. Ahmad, P. F. Levelt, P. K. Bhartia *et al.*. Atmospheric products from the ozone monitoring instrument (OMI) [C]. *SPIE*, 2003, **5151**: 619~631

5 Solar spectral irradiance (SSI) data. http://lasp.colorado.edu/sorce/ssi_data