

文章编号 1004-924X(2006)05-0775-06

紫外辐照对绝对辐射计锥腔吸收率的影响

方伟¹, 王玉鹏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. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了研究紫外辐照对星载太阳辐射监测仪的绝对辐射计锥腔吸收率的影响, 进行了实验室模拟测量实验。用相当于太阳紫外辐照总量的汞灯照射绝对辐射计的锥腔, 定期用可同时测量镜、漫反射率的全半球反射比吸收率测量装置测量其吸收率, 监测其随时间变化情况。实验结果表明: 太阳辐射监测仪在风云三号卫星上例行工作一年接收的紫外辐射量, 使其吸收率下降 0.002%, 最大下降 0.003%, 该结果同国外星上测量结果基本一致。本实验反映出紫外辐照对绝对辐射计锥腔的吸收率是有影响的, 可为将来的星载太阳辐射监测仪优化、实验、测量和校正提供必要的参考。

关键词: 太阳辐射监测仪; 绝对辐射计; 锥腔; 紫外辐照; 吸收率

中图分类号: TH765.2 **文献标识码:** A

Influence of UV radiation on absorptivity of cavity of absolute radiometer

FANG Wei¹, WANG Yu-peng²

(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 the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract: To investigate the influence of the solar UV radiation on the absorptivity of the cavity of absolute radiometer of solar irradiance monitor on satellites, a simulated experiment is carried out in laboratory. A hydragyrum lamp with irradiance equaled to the total solar UV irradiance is used to irradiate the cavities. The change of the absorptivity of the cavity with the UV radiation quantum is measured by an integrating measurement instrument on the reflectance of black cavity within a full hemisphere (include the entrance of the Ulbrichtsphere), which can measure the absorbance of the mirror reflection and the diffused reflection in a high precision simultaneously. The results show that the UV radiation received by the solar irradiance monitor on FY-3 satellite will cause the absorptivity degradation of the cavity of absolute radiometers of 0.002% per year, and the most is 0.003% per year. The result is consistent with the changing instance of other absolute radiometers for measuring solar irradiance on other satellites basically. The experiment indicates that the UV irradiance has influence on the absorptivity of the cavity of absolute radiometer on satellites. The result also might supply essential

收稿日期: 2005-12-15; 修订日期: 2006-07-18.

基金项目: 应用光学国家重点实验室开放基金(No. DA04Q07)。

reference for optimization, experiment, measurement and calibration of the solar irradiance monitor on satellites in future.

Key words: solar irradiance monitor; absolute radiometer; cavity; UV radiation; absorptivity

1 引言

为深入研究全球环境变化和气候变迁规律,需要精确测量太阳辐照度并长期连续监测其微小变化。卫星上观测太阳辐照度的绝对辐射计,在太阳紫外辐射的照射下,其黑体接收腔的吸收率会下降,影响对太阳辐照度的精确测量及对其微小变化进行长期连续监测。美国太阳活动年任务(SMM)卫星上的测量太阳辐照度的有源腔型辐射计辐照度监测器 ACRIMI 在其工作的 9.75 年期间,锥腔吸收率下降 0.06%^[1],折合每年下降 0.006%,欧空局太阳日光层观测器/太阳辐照度变化和引力振动(SOHO/VIRGO)上两种类型的绝对辐射计锥腔吸收率都有不同程度的下降,比利时的 DIARAD 每天下降 0.29×10^{-6} ,瑞士的 PMO6 每天下降 3.34×10^{-6} ^[2],折合 DIARAD 每年下降 0.01%,PMO6 每年下降 0.12%。吸收率的下降情况随腔形结构(圆锥腔、倒锥腔、圆柱腔)、涂黑材料以及涂黑层是漫反射或镜反射而有所不同。为了研究紫外辐照对星载太阳辐射监测仪的绝对辐射计锥腔吸收率的影响,进行了实验室模拟测量实验。根据正在研制的风云三号气象卫星上的太阳辐射监测仪^[3-4]在轨道上工作测量太阳辐照度时太阳辐照绝对辐射计(SIARs)^[5-6]接收的紫外辐照量(紫外辐照度 $\text{mW}/\text{cm}^2 \times \text{天数}$),在实验室用相当于卫星寿命期间太阳辐射监测仪被照的紫外辐照量的汞灯紫外光照射锥腔,定期用可同时测量镜、漫反射率的全半球反射比吸收率测量装置测量其吸收率,监测其随时间变化情况。实验结果表明:风云三号卫星太阳辐射监测仪上用的锥腔,在卫星上例行工作一年接收的紫外辐射量,使其吸收率下降 0.002%,最大情况下下降 0.003%。

2 锥腔紫外辐照实验方法

2.1 风云三号卫星太阳辐射监测仪简介

风云三号卫星太阳辐射监测仪由三套相同的

宽视场 SIARs 互成一定角度安装构成^[3-4]。在卫星上把三台绝对辐射计朝向飞行方向安装,在卫星从地球阴影飞出的北极附近,太阳在其视场上扫过的时间内进行太阳辐照度测量^[7-8]。每台绝对辐射计的视场角如图 1 所示。无遮拦视场(slope angle)为 18.4° (太阳光斑全部入射辐射计),半强度视场(opening half angle)为 26° (太阳光斑遮拦一半所对应的视场),全视场为 34° (这一视场是太阳光刚入射所对应的视场)。

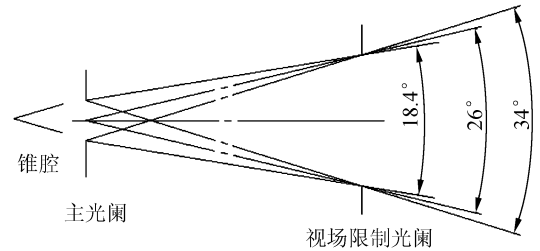


图 1 绝对辐射计视场角

Fig. 1 FOV of absolute radiometer

风云三号气象卫星上的太阳辐射监测仪三个通道的光轴位于 XOY 平面上,分别与卫星 X 轴成 22° 、 27° 、 32° 夹角,与 Z 轴垂直,与 -Y 轴成 68° 、 63° 、 58° 夹角,分别定义为 AR₁、AR₂ 和 AR₃ 通道。太阳辐射监测仪三视场角及其组合排列如图 2 所示。

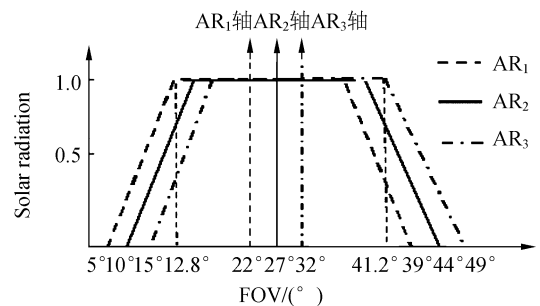


图 2 三台绝对辐射计的视场角排列

Fig. 2 Arrange of FOV of three absolute radiometers

太阳辐射监测仪共有三种在轨工作模式:通道自测试模式、太阳辐照度测量模式和冷空间测量模式。卫星进入轨道,仪器加电开机后,自动进

入通道自测试模式,然后进入等待状态;当太阳光进入绝对辐射计视场时,开始太阳辐照度测量;可采用冷空间测量来校正仪器的温度与背景辐射^[9]。在极轨道太阳同步气象卫星上采用这种测量方法,可以在每一天,每一圈轨道上都能测得太阳辐照度数据。从图 2 可看出三台绝对辐射计的视场角大部分重叠,在此期间可两台或三台仪器同时测量。在实际应用中,通常采用三台绝对辐射计中两台进行例行测试,另一台定期测量,以便对长期工作的两通道进行稳定性考核,也就是对长期工作接收紫外辐照的两台绝对辐射计的锥腔吸收率变化情况进行考核、校正。

2.2 紫外辐照光源

太阳辐射中短于 400 nm 的紫外辐射占太阳总辐射量的 8.7%,太阳平均总辐照度为 136.7 mW/cm²,所以紫外辐照量为 136.7 mW/cm² × 8.7% = 12.3 mW/cm²。

风云三号卫星太阳辐照度监测仪在轨运行时锥腔接收太阳光的时间为 4 min/轨道圈(101 min),即年被照射的累积照射天数为 365 × 4/101 ≈ 15(天)。

对锥腔进行紫外辐照试验采用的是 1 000 W 紫外汞灯,在距灯管中心 250 mm 处的紫外辐照度等于在地球大气层外太阳紫外辐照度的 2 倍。

用上述紫外灯在 250 mm 处照射(太阳辐射的 2 倍),因此照射 7.5 天即相当于一年的照射量。所以三年的照射量需要照射 22.5 天。试验中每照射 10 天(相当于在卫星上工作了 1.25 年)后测量一次观测其反射率的变化。

2.3 测量仪器

绝对辐射计的测量原理是利用光电等效性,锥腔对光的吸收率能否准确测量,直接影响测量光的准确性。不同结构的锥腔及内表面不同的吸收材料都导致锥腔的吸收率有差别,而且很多材料的表面都既不是纯镜反射,也不是纯漫反射,而是两种反射以一定比率的混合。一般的测量装置只是单纯的镜反射或漫反射测量装置,且由积分球开口射出的光没有测量到。我们研制出了一种新型的镜、漫反射率可同时精确测量的新型全半球积分测量装置^[10],见图 3。用此装置对风云三号卫星太阳辐射监测仪的 SIARs 绝对辐射计的锥腔反射比随紫外辐照变化情况进行了测量、考核。

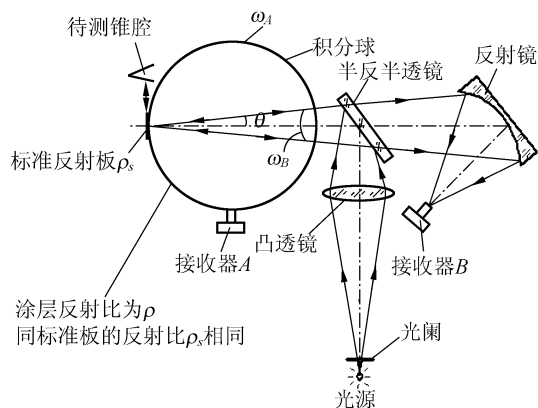


图 3 全半球反射比积分测量装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reflectance measurement instrument

光源发出的光线经光阑、凸透镜会聚后入射到半反半透镜,有一半光线被反射进积分球照射到待测锥腔或标准反射板上,光线一部分被吸收,另一部分被待测锥腔或标准白板向四周反射,经积分球 ω_A 立体角(除去入射光开口 ω_B)的漫射作用被接收器 A 接收;在开口 ω_B 立体角被反射的光线沿入射光的原路返回到半反半透镜上,透过半反半透镜的光被会聚反射镜收集后被接收器 B 接收。接收器 A 和接收器 B 是采用硅光二极管电流放大输出形式的接收器,标准白板为用硫酸钡制作的反射率大于 90% 的漫反射平面,光源采用由高精度稳压稳流源供电的 100 W 卤钨灯,光阑孔径为 3 mm,使光源发出的光经过光阑后变为孔径为 3 mm 的圆形光,经凸透镜会聚后射到半反半透镜,然后被反射进积分球照射到待测锥腔或标准白板上形成直径为 6 mm 的圆形光,全部落入待测锥腔内。

图 3 所示的实际测量系统中,入射光的开口对放反射板的中心位置的立体角为 ω_B ,反射板的半球立体角的其余部分的立体角为 ω_A ,也就是 $\omega_A + \omega_B = (2\pi)$ 半球,即 $\omega_A = \text{半球} - \omega_B$ 。在这种系统中实际测量时分两次获得全半球(2π)的反射比因子。

该测量装置测得的锥腔的反射率计算公式为

$$\rho = \rho_s (1 - \sin^2 \theta) \frac{U_A}{U_{SA}} + \rho_s \sin^2 \theta \frac{U_B}{U_{SB}}, \quad (1)$$

式中, U_A 为测待测锥腔时接收器 A 的输出电压改变量;

U_{SA} 为测标准白板时接收器 A 的输出电压改

变量;

U_B 为测待测锥腔时接收器 B 的输出电压改变量;

U_{SB} 为测标准白板时接收器 B 的输出电压改变量;

ρ_s 为标准白板的反射率;

θ 为积分球开口半角。

从公式(1)可看出锥腔反射率 ρ 等于漫反射率(第一项)和镜反射率(第二项)的和。锥腔的吸收率 $\epsilon = 1 - \rho$ 。

黑体锥腔的反射比很低($10^{-3} \sim 10^{-4}$),漫反射标准白板反射比大于 90%,因此,它们的反射光强度相差 3~4 个量级,因此探测器信号输出必须在 4 个量级以上线性才行。由于所用硅光二极管采用了电流放大,它在 6 个量级输出信号同光照强度是线性的。但是,为了验证它的线性,用逐步增加中性滤光片来分级降低光强的方法来验证^[10]。测量实验结果重复性 $\sigma = 4 \times 10^{-5}$,从实验结果可以看出在 10^{-4} 量级,其线性是好的,可以用这个装置测量反射比为 10^{-4} 量级的黑体锥腔的反射比。

3 实验结果与分析

为了考查风云三号卫星太阳辐照度监测仪中 SIARs 绝对辐射计圆锥腔在空间太阳紫外光照下腔吸收率的变化,选择与风云三号 SIARs 圆锥腔结构、工艺完全相同的三个圆锥腔,进行了紫外光照射老化实验。

在风云三号卫星上用的绝对辐射计圆锥腔前加的主光阑是半球反射型的,所以增加了腔的吸收率。这次老化考核实验的主要目的是为了研究在紫外光照射下腔吸收率的变化情况。整个考核和测量过程中圆锥腔前未加半球型反射主光阑,因此,它的吸收率比风三卫星上用的情况要低(也就是反射比高一些)。

测量结果列入表 1。

从测量数据可以看出,在所用的测量装置中 ω_2 为 $\theta_2 = 5^\circ$, $\sin^2 \theta_2 = 7.6 \times 10^{-3}$,这时锥腔的 $\sin^2 \theta \cdot U_B / U_{SB}$ 比 $(1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$ 小两个量级,所以可以用 $\rho \cong \rho_s (1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$ 代表半球的反射比。

表 1 紫外辐照锥腔反射率变化数据

Tab. 1 Changing data of reflectivity under UV radiation

年	反射方式	锥腔反射率		
		1# 锥腔	2# 锥腔	3# 锥腔
0	$(1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$	1.69×10^{-3}	1.88×10^{-3}	1.68×10^{-3}
	$\sin^2 \theta \cdot U_B / U_{SB}$	3.41×10^{-5}	4.60×10^{-5}	3.38×10^{-5}
1.25	$(1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$	1.77×10^{-3}	2.02×10^{-3}	1.84×10^{-3}
	$\sin^2 \theta \cdot U_B / U_{SB}$	4.40×10^{-5}	5.80×10^{-5}	4.27×10^{-5}
2.5	$(1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$	2.01×10^{-3}	2.19×10^{-3}	1.95×10^{-3}
	$\sin^2 \theta \cdot U_B / U_{SB}$	4.82×10^{-5}	6.51×10^{-5}	5.87×10^{-5}
3.75	$(1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$	1.92×10^{-3}	2.06×10^{-3}	1.96×10^{-3}
	$\sin^2 \theta \cdot U_B / U_{SB}$	5.10×10^{-5}	5.70×10^{-5}	5.67×10^{-5}
5	$(1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$	1.89×10^{-3}	2.19×10^{-3}	2.03×10^{-3}
	$\sin^2 \theta \cdot U_B / U_{SB}$	5.65×10^{-5}	5.93×10^{-5}	6.4×10^{-5}
6.25	$(1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$	2.43×10^{-3}	2.33×10^{-3}	2.46×10^{-3}
	$\sin^2 \theta \cdot U_B / U_{SB}$	5.58×10^{-5}	6.05×10^{-5}	6.76×10^{-5}
7.5	$(1 - \sin^2 \theta) \cdot U_A / U_{SA}$	2.81×10^{-3}	2.87×10^{-3}	2.73×10^{-3}
	$\sin^2 \theta \cdot U_B / U_{SB}$	8.0×10^{-5}	10.0×10^{-5}	7.80×10^{-5}

图 4 为锥腔漫反射率变化曲线,图 5 为锥腔镜反射率变化曲线。

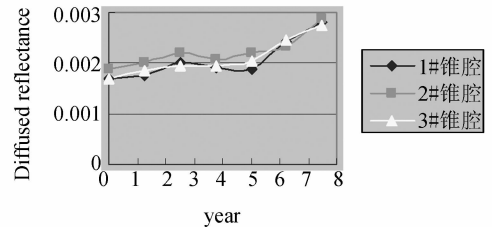


图 4 锥腔漫反射率变化曲线

Fig. 4 Changing curve of diffused reflectance of cavity

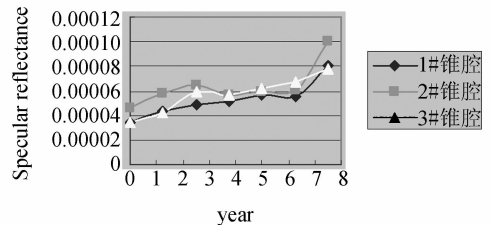


图 5 锥腔镜反射率变化曲线

Fig. 5 Changing curve of specular reflectance of cavity

从三个锥腔的紫外辐照老化情况来看,可以明显看出紫外辐照老化后反射率增加的情况(即

吸收率降低)。大约紫外照射 60 天(相当于在风云三号上工作 7.5 年)后反射率从 1.8×10^{-3} 增加到 2.3×10^{-3} , 即相当于每年反射率提高 $\frac{(2.3-1.8) \times 10^{-3}}{1.8 \times 10^{-3}} \div 7.5 \cong 0.04$ 。这种锥腔加反射半球主光阑(风云三号卫星上用的情况),其反射率为 5×10^{-4} 以下,这时估算的反射率增加值为 $5 \times 10^{-4} \times 4 \times 10^{-2} = 2 \times 10^{-5}$,也就是说每年反射率要增加 0.002% 左右,也就是吸收率每年降低 0.002%。

本模拟实验计算时按在轨测量时每一圈轨道有 4 min 接受太阳光照射,但实际测量模式采样时间是可变的,如果按最长采样时间 6 min 计算,吸收率变化最大情况就是每年降低 0.003%。

4 结 论

紫外辐照老化引起的锥腔吸收率下降,对长期监测太阳辐照度来说是必须考虑的。从本实验可得出紫外辐照对腔的吸收率是有影响的这一点说明结论是肯定的,但由于地面试验条件同卫星在轨工作环境不完全一致,不能完全模拟真实在轨太阳紫外辐照情况:(1)在紫外谱段,太阳光是连续的,汞灯是线谱(253.7 nm、365 nm),(2)地面模拟实验时光源离锥腔较近,辐射加热也加速了锥腔的氧化,所以本次老化试验结果不能作为定量依据。实际在轨测量中保留一个绝对辐射计定期以比对的方法监视例行测量的绝对辐射计变化并进行修正是必要的。SMM 采用三个 ACR 通道:通道 A 正常工作,通道 B 一个月工作一次,

通道 C 三个月工作一次,用于比对测量。VIRGO 采用两个 PMO6 和两个 DIARAD,一套例行测试,另一套定期工作与其比对,标定例行工作通道的下降情况。为了监测和校正长期监测太阳辐照度的绝对辐射计锥腔的逐步下降情况,风云三号卫星太阳辐射监测仪上配备了三套 SIARs:其中两台 SIARs 进行长期例行测量工作;一台 SIARs 绝对辐射计作为标准,大部分时间快门关闭不工作,只是定期的同另两个 SIARs 同时观测太阳,以监测它们的稳定性和吸收率的变化,并对其测量数据进行校正。

从报道的试验结果可以看出,PMO6 下降最快,而与它在同一个卫星上的 DIARAD 下降就小得多,PMO6 采用 45° 倒锥镜反射黑,DIARAD 采用漫反射黑,所以有资料认为漫反射黑的抗紫外辐照性能好于镜反射黑,所以美国最近 SORCE 卫星上的 TIM 采用把电镀出来的镍磷镜反射黑通过刻蚀的方法变成纯漫反射黑。SIARs 的锥腔与 ACRIM 的类似,只是 ACRIM 的锥腔是纯镜反射黑,而 SIARs 的锥腔是镜漫反射混合黑,所以实验结果也比较接近。

本实验反映出紫外辐照对绝对辐射计锥腔的吸收率是有影响的,可为将来的星载太阳辐射监测仪在轨测量和校正提供必要的参考。通过将来的卫星飞行实验的比对实验还可以反过来验证本老化考核实验的符合程度,以便进一步改进地面模拟考核实验的方法与手段,还可以通过实验来指导接收腔的设计工作,以达到最优化。

参考文献:

- [1] RICHARD C W, HUGH S H. The sun's luminosity over a complete solar cycle[J]. *Nature*, 1991, 351:42-44.
- [2] CLAUSE F. In-flight performance of the virgo solar irradiance instruments on Soho[J]. *Solar Physics*. 1997, 175: 267-286.
- [3] FANG W, YU B X, YAO H S. Development of STIM[J]. *SPIE*, 2003, 4895:218-224.
- [4] 徐博明. 气象卫星有效载荷技术[M]. 北京:宇航出版社.
XU B M. *Efficiency load technology on weather satellite* [M]. Beijing: Publishing Company on Space Navigation, (in Chinese)
- [5] 方伟,金锡峰.一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制[J]. *太阳能学报*, 1992, 13(3):406-411.
FANG W, JIN X F. Development of a compensate dual-conical cavity absolute radiometer[J]. *Acta Energiæ Solar Sinica.*, 1992, 13(3):406-411. (in Chinese)
- [6] 方伟,禹秉熙,姚海顺.太阳辐照绝对辐射计(SIAR-1)与国际比对[J]. *光学学报*, 2003, 23(1):112-116.

- FANG W, YU B X, YAO H S. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1): 112-116. (in Chinese)
- [7] WANG Y P, FANG W, YU B X. The simulation measurement experiment and calibration for Solar Total Irradiance Monitor on board[J]. *SPIE*, 2006, 6031: 603118-1-6.
- [8] 禹秉熙, 方伟, 王玉鹏. 卫星宽视场绝对辐射计太阳越过视场时入射光变化与腔温响应函数[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 353-358.
YU B X, FANG W, WANG Y P. The radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2004, 12(4): 353-358. (in Chinese)
- [9] 禹秉熙, 方伟, 王玉鹏. 卫星上绝对辐射计观测太阳时同太空背景的辐射交换[J]. *光学学报*, 2005, 25(8): 1048-1052.
YU B X, FANG W, WANG Y P. Radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(8): 1048-1052. (in Chinese)
- [10] FANG W, WANG Y P, YU B X. The full hemisphere integrating measurement of the reflectance of black cavity [J]. *SPIE*, 2006, 6033: 1-8.

作者简介: 方伟(1965—), 女, 主任设计师, 研究员, 山东大学光学系本科毕业, 中国科学院研究生院博士毕业, 从事绝对辐射测量技术、航天光学遥感技术等研究。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn