

# 真空环境中太阳辐照度绝对辐射计腔温响应的变化及其影响

杨振岭 方伟\* 宋宝奇 骆杨 王玉鹏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 为了考察真空环境对太阳辐照度绝对辐射计辐射测量值及其对世界辐射基准修正系数的影响,提高在轨辐射测量值向世界辐射基准的溯源精度,改善不同仪器在轨辐射量值的一致性,进行了真空环境中太阳辐照度绝对辐射计腔温响应变化及其影响的测量和评估。真空环境中,由于缺少了空气对流这一传热途径,使得在相同的加热功率下,辐射计腔温响应的时间常数变长,并且平衡温度升高,导致辐射计黑体腔响应度明显降低。在真空和空气中,对相同的测量目标进行辐射测量,结果表明由于真空中黑体腔时间常数和响应度的变化,导致测量的辐射功率有 0.15% 的相对偏差,进而造成真空环境中的辐射测量值向世界辐射基准的修正系数发生 0.15% 的相对变化。

**关键词** 测量;温度响应;绝对辐射计;太阳总辐照度;世界辐射基准

中图分类号 TP73 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0912008

## Variation of Solar Irradiance Absolute Radiometer Cavity Temperature Response in Vacuum and Its Effect

Yang Zhenling Fang Wei Song Baoqi Luo Yang Wang Yupeng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** In order to investigate the influence of vacuum environment on the measured value of solar irradiance absolute radiometer (SIAR) and its auxiliary value to the world radiometric reference (WRR), and improve the tracing accuracy of on-orbit solar irradiance measurements to WRR and consistency of measurements of different on-orbit instruments, the variation of cavity temperature response and its effect of SIAR in vacuum environment are measured and estimated. Since the absence of air convection in vacuum, the time constant of SIAR cavity temperature response becomes longer and the equilibrium temperature becomes higher in the same heating power with that in air, thus the responsibility of SIAR cavity is significantly reduced. The radiometric measurement results of the same target in vacuum and air environment show a relative difference of 0.15% between the measured irradiances since the variation of time constant and responsibility, which causes 0.15% changes in the auxiliary value of radiometric measurements in vacuum to WRR.

**Key words** measurement; temperature response; absolute radiometer; solar total irradiance; world radiometric reference

**OCIS codes** 120.3930; 120.5630; 120.4800

### 1 引言

太阳是地球最重要的外部能量来源,是地球气候系统重要的驱动力,其总辐照度的微量变化都会

对地球气候产生影响。从 20 世纪 70 年代末,人们就开始将测量太阳总辐照度的绝对辐射计搭载在航天器上进行大气层外的太阳总辐照度测量。三十多

收稿日期: 2013-05-22; 收到修改稿日期: 2013-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(41227003)

作者简介: 杨振岭(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事绝对辐射测量、低温辐射计等方面的研究。

E-mail: yangzl@ciomp.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

年的太阳总辐照度连续观测给出了太阳活动的 11 年变化周期<sup>[1]</sup>,以此数据为基础计算了太阳辐射对地球气候系统的驱动效应<sup>[2]</sup>。太阳总辐照度的连续高精度测量数据已经成为太阳活动、地球中长期气候变化等研究领域的重要基础性数据<sup>[3]</sup>。

测量太阳总辐照度的腔型绝对辐射计采用电替代原理,利用电功率复现光功率造成的腔温变化来测量光功率<sup>[4]</sup>。不同类型的绝对辐射计由于工作模式、数据处理方法等差别,辐射测量值存在固定偏差,不利于不同仪器测量数据的相互对比,影响了太阳总辐照度测量数据的一致性。为此世界辐射中心(WRC)将不同类型的多台绝对辐射计进行对比,取其加权平均值作为世界辐射基准(WRR)<sup>[5]</sup>,由 7 台不同类型的绝对辐射计组成世界标准组(WSG)保存和传递 WRR 的辐射量值标度。为了传播 WRR,保持世界范围内辐射测量值的一致性,WRC 定期举办国际日射强度计比对,实验测量出不同仪器向 WRR 溯源的比对修正系数,矫正和标定世界各国的辐射测量仪器。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的太阳辐照度绝对辐射计(SIAR),参加过三次国际比对,并且作为 FY-3 气象卫星的有效载荷,实现了对太阳总辐照度的长期在轨监测<sup>[6-10]</sup>。参加国际比对的 SIAR 作为 WRR 的传递标准,对上天的 SIAR 进行了比对和矫正。由于在轨的高真空环境与地面比对环境有较大差别,这种环境的差别直接影响辐射计腔温的响应,对 FY-3 的 A 星和 B 星上搭载的太阳辐射监测仪来讲,由于项目本身对定标精度的要求不高,在真空和高低温环境实验过程中,没有对真空环境造成的辐射计腔温响应的变化及其影响进行测量。而对 FY-3 的 C 星太阳辐射监测仪的性能指标的要求有所提高,目前 C 星太阳辐射监测仪还在产品研制阶段,参考 FY-3 卫星的紫外臭氧垂直探测仪<sup>[11]</sup>真空与空气环境中定标的差别<sup>[12-13]</sup>,有必要对真空环境中绝对辐射计腔温响应过程及其对辐射测量的影响进行定量评估。本文针对 SIAR 进行了真空中腔温的稳态和瞬态的响应测量,并结合 SIAR 的测量原理,评估了真空环境对辐射测量和比对修正系数的影响。

## 2 SIAR 测量方法

SIAR 采用光电等效原理,用可以精确测量的电功率标定未知的光功率<sup>[14]</sup>,进而与接收面积联合得到辐照度。测量过程中首先进行加光测量,打开

快门,辐射计黑体腔接收光功率  $P_0$ ,同时在腔上加低电功率  $P_1$ ,一段时间后腔温平衡到  $T_1$ ;关闭快门进行电标定,在腔上加高电功率  $P_2$ ,一段时间后腔温平衡到  $T_2$ 。光电等效的理想情况下,应该追求两阶段的平衡温度相同,即  $T_1 = T_2$ 。但是由于 SIAR 在打开快门加光测量阶段采用快速预测方法<sup>[15]</sup>计算应该附加的低电功率值,而在关闭快门电标定阶段采用腔温比较的方法确定所加高电功率值,造成两个阶段绝对辐射计腔温不能达到完全相同, $T_1$  和  $T_2$  之间有差别,这种温度的差别对应的加热功率的差异,在测量过程中需要修正。

SIAR 在修正开、关快门的两个阶段温度差别对应的功率差时,采用腔温的功率响应度修正方法<sup>[16]</sup>。在开快门加光和关快门电标定的太阳测量模式前,先进行自测试模式,即关闭快门,加不同的电功率  $P_H$ 、 $P_L$ ,测量黑体腔在不同的电功率加热下的平衡温度  $T_H$ 、 $T_L$ ,进而计算出腔温的功率响应度  $S = (P_H - P_L) / (T_H - T_L)$ 。由此响应度计算太阳测量模式中,被黑体腔吸收的光功率为

$$P_0 = P_2 - P_1 - S(T_2 - T_1), \quad (1)$$

结合黑体腔吸收率  $\alpha$  以及接收太阳辐射的面积  $A$ ,给出测量的太阳总辐照度

$$E_0 = \frac{P_0}{\alpha A} = \frac{P_2 - P_1 - S(T_2 - T_1)}{\alpha A}, \quad (2)$$

以上的温度均为绝对辐射计中测量腔温变化的热电偶输出温度经模/数(A/D)转换后的码值。太阳测量模式中两阶段所加的高、低电功率值由仪器直接测量输出。

## 3 真空中绝对辐射计腔温响应

SIAR 在真空环境中的腔温响应的变化测量是在 KM1200-1600 真空环境实验系统(北京中科科美真空技术有限责任公司)中进行的。实验系统的真空室为卧式圆筒形,真空室内尺寸为  $\Phi 1400 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$ ,采用 TRP-90 型直连式真空泵和两台 FF-1600 分子泵对真空室抽真空,测试时真空度为  $10^{-5} \text{ Pa}$ 量级。将 SIAR 放入真空室中,测试连接线经过真空室的接线法兰引出,接到测试电源和计算机上。待辐射计整体温度与环境温度相同且真空度稳定后进行测量。

在自测试模式下,辐射计快门关闭,在黑体腔上加 75 mW 电功率,测量腔温的变化,给出黑体腔瞬态温度响应曲线。当黑体腔加热功率为  $P$  时,腔温变化满足的热力学微分方程<sup>[17]</sup>,即

$$C \frac{dT(t)}{dt} + KT(t) = P, \quad (3)$$

式中  $C$  为黑体腔热容,  $K$  为传热速率。解此方程可得腔温的时间变化函数, 即

$$T(t) = \frac{P}{K} [1 - \exp(-t/\tau)] = T_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (4)$$

式中  $\tau = C/K$ , 为腔温变化的时间常数;  $T_0 = P/K$ , 为平衡温度。

图 1 给出了空气中和真空中测量的辐射计黑体腔归一化的瞬态温度响应曲线及利用(4)式得到的拟合结果, 其中 Adj. R-Square 是指拟合曲线与实验点的相合程度, 越接近于 1, 相合得越好。自测试模式温度采样时间为 5 min, 采样间隔为 5 s。由图 1 可以看出, 真空环境中与空气中相比, 辐射计黑体腔在相同的电功率加热条件下, 腔温趋于稳定的时间变长, 时间常数从空气中的 12.86 s 变为真空中的 25.44 s。这是由于真空环境中辐射计黑体腔缺少了空气对流这一传热途径, 使得黑体腔传热速率变小, 达到平衡温度所需时间变长。

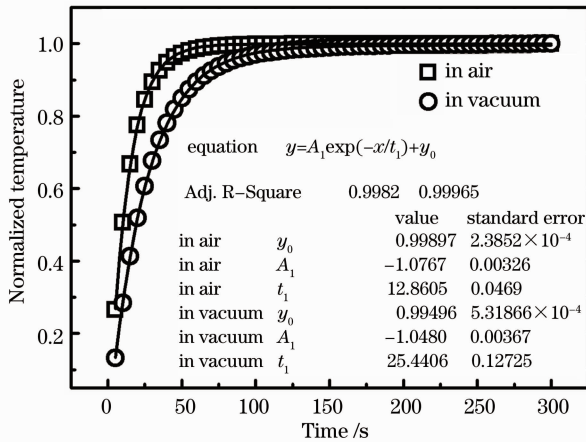


图 1 真空和空气中辐射计腔温的瞬态变化曲线及拟合结果

Fig. 1 Transient curves and fitting results of SIAR cavity temperature in vacuum and air

从(4)式可以看出, 传热速率变小时, 黑体腔稳态平衡温度也会相应变大。为了更为精确地表征真空环境和空气中的黑体腔稳态温度响应的差别, 分别在两种环境中给黑体腔加 10、45、75 mW 的电加热功率, 考察其平衡后的温度输出码值, 采样时间为 5 min。图 2 为辐射计黑体腔稳态温度响应曲线。从图 2 可以看出, 在同一环境中, 温度输出码值和所加电功率呈线性关系, 此直线的斜率, 即单位温度输出码值对应的功率, 即为黑体腔的温度响应度  $S$ 。

与空气中相比, 相同的电加热功率在真空环境中会引起黑体腔较大的温度码值输出, 相应的响应度  $S$  变小。对于实验中所用的辐射计来讲, 响应度从空气中的 0.00401 降低到真空中的 0.00336, 降低了 16%。

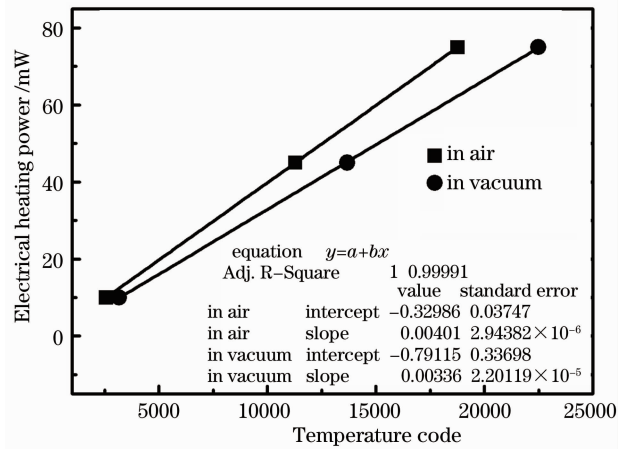


图 2 真空和空气中辐射计黑体腔温度的稳态响应

Fig. 2 Steady state responses of SIAR cavity temperature in vacuum and air

从上述实验结果可以看出, 真空环境中由于辐射计传热途径发生变化, 使得瞬态和稳态温度响应均发生了相应的变化, 在相同的电加热功率下, 腔温会更慢地趋于稳定, 稳定的温度也会相应地变高。

#### 4 真空环境对辐射测量和比对修正系数的影响

为了考察真空环境中由于辐射计黑体腔温度响应的差别对辐射测量的影响, 利用溴钨灯作为光源, 在两种工作环境中, 测量了绝对辐射计接收的辐射量值。溴钨灯(24 V, 150 W)发出的光经过透镜准直后, 由真空系统的熔石英窗口射入真空室, 被辐射计接收, 实验过程中光路保持固定, 可以认为两种环境中光是沿相同路径到达辐射计。辐射计执行正常的辐射测量过程, 即先执行自测试模式, 给出腔温的功率响应度, 再执行太阳测量模式, 测量其接收的光辐射功率, 采样时间均为 5 min。

如前文所述, 太阳测量模式中, 开快门加光测量阶段, 黑体腔加一个电功率, 使得光功率和此电功率的总和与关快门电标定阶段所加的电功率维持在大致相同的水平。图 3 给出了两种工作环境中采用太阳测量模式测到的温度输出曲线, 曲线 1, 2 为真空环境中的测量结果, 曲线 3, 4 为空气环境中的测量结果。由图 3 可以看出, 加光测量和电标定两阶段的平衡温度并不完全相等, 存在一定的温度差别, 这种温

度的差别在真空环境中更为明显。

采用快速预测电补偿方法的 SIAR, 在开快门之初根据腔温输出码值计算出时间常数和可能的平衡温度, 以此平衡温度和自测试响应度计算出所加光功率的预测值, 75 mW 与此光功率预测值的差值为加光测量阶段所加的电功率  $P_1$ ; 在电标定阶段, 先加 75 mW 电功率, 考察黑体腔温度相比于加光测量阶段平衡温度的变化情况, 调节所加电功率至  $P_2$ , 使腔温趋向与加光测量阶段温度相同。在空气中测量时, 黑体腔温度能够较为快速地达到平衡, 在 5 min 的采样时间内, 腔温能够达到稳定平衡状态, 加光测量阶段的预测和电标定阶段的调节能够较为准确, 两阶段平衡温度差别在 284 个码值; 而在真空环境中, 腔温响应的的时间常数较长, 导致加光测量和电标定两阶段平衡温度相差 697 个码值。

根据(1)式可以计算出两种实验条件下黑体腔吸收光功率:  $P_{0, \text{air}} = 36.659 \text{ mW}$ ,  $P_{0, \text{vacuum}} = 37.872 \text{ mW}$ 。

相同的光源功率和光路设置, 在两种工作环境中分别进行了多次测量, 测量结果见表 1。由表 1 中的辐射测量结果可以看出, 相同的测量目标, 真空环境中测量的功率值偏大, 重复性较好。由于真空和空气环境中测量的光功率受到真空室内空气吸收的影响, 利用低分辨力大气传输模型 (LOWTRAN) 评估了真空室内空气吸收对测量光功率的影响。图 4 为 LOWTRAN 计算的大气光谱透射率 (使用 1976 年美国标准大气), 以及大气吸收修正前后的溴钨灯光谱 (典型色温 2900 K<sup>[18]</sup>)。对修正前后的溴钨灯光谱进行积分, 得到真空室内光路上被大气吸收的光能量在 2.9% 以上。扣除大气吸收后, 在空气环境

中的测量功率值也在表 1 中给出。

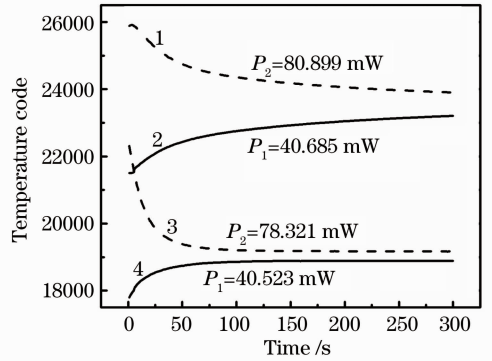


图 3 真空和空气中太阳测量模式加光测量(实线)和电标定(破折线)阶段的温度输出曲线

Fig. 3 Temperature curves of light measurement period (solid) and electrical calibration period (dash) of solar measurement mode in vacuum and air

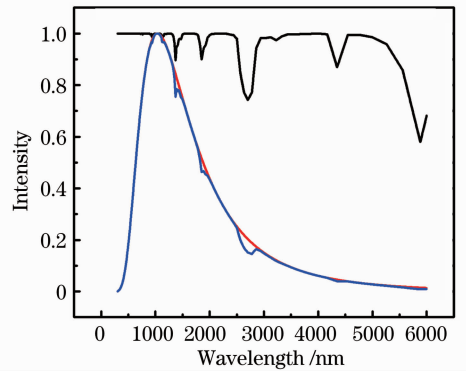


图 4 大气光谱透射率(黑色), 以及大气吸收修正前(红色)、后(蓝色)溴钨灯发射光谱

Fig. 4 Curves of atmospheric spectral transmittance (black) and emission spectra of bromine tungsten lamp before (red) and after (blue) atmospheric absorption correction

表 1 真空和空气环境中的辐射测量结果

Table 1 Radiometric measurement results in vacuum and air

	Measured power in vacuum /mW	Measured power in air /mW	Measured power in air with the atmosphere absorption deducted /mW
1	37.872	36.659	37.754
2	37.831	36.726	37.823
3	37.845	36.706	37.802
Average value	37.849	36.697	37.793
Standard deviation	0.021	0.034	0.035

由表 1 可知, 相同的测量目标, 真空和空气环境中绝对辐射计测量的功率值分别为:  $P_{0, \text{air}} = 37.793 \text{ mW} \pm 0.035 \text{ mW}$ ,  $P_{0, \text{vacuum}} = 37.849 \text{ mW} \pm 0.021 \text{ mW}$ 。

上述结果已经扣除了大气吸收的影响, 所以由绝对辐射计温度响应差别造成的测量值差异的平均

值为 0.056 mW, 最大差别为 0.118 mW。利用此差别, 将绝对辐射计黑体腔吸收率  $\alpha = 0.9996$ 、接收辐射面积  $A = 50.24 \text{ mm}^2$  ( $\Phi 8 \text{ mm}$  光阑) 代入(2)式得到对应的辐照度差别平均值为  $1.12 \text{ W/m}^2$ , 最大值为  $2.35 \text{ W/m}^2$ , 空气中测量值相对差别平均值为

0.15%，最大值为0.31%。

在轨测量太阳总辐照度的绝对辐射计，在上天之前进行地面比对测量，以确定此种绝对辐射计辐射量值向世界辐射基准 WRR 的修正系数。本课题组研制的 SIAR 参加过三次世界辐射中心举办的国际比对，有两台仪器 (SIAR-1a 和 SIAR-2c) 作为 WRR 的传递标准，对上天的绝对辐射计进行标定，两台仪器向 WRR 的修正系数分别为  $R_{1a} = 1.002401$  和  $R_{2c} = 0.999839$ <sup>[19]</sup>。地面比对测量时，利用两台传递标准辐射计与上天的绝对辐射计同时跟踪太阳测量，两台传递标准辐射计辐照度测量值与向 WRR 的修正系数的加权平均得到 WRR 计算值，此计算值与上天的绝对辐射计辐照度测量值相比，给出比对修正系数，通过多次测量得出此修正系数的平均值与测量精度。正如前文所述，绝对辐射计对同一目标的辐照度测量值在真空与空气中相比有0.15%的相对偏差，结合比对修正系数的计算过程，真空环境对比对修正系数也会产生0.15%左右的影响。

## 5 结 论

将测量太阳总辐照度的绝对辐射计放置在真空环境中，分别在自测试模式和太阳测量模式下，测量了辐射计黑体腔温度的稳态和瞬态响应，并以此评估了真空环境对辐射测量及其向 WRR 的修正系数的影响。与空气中相比，辐射计在真空环境工作由于缺少了空气对流这一传热途径，使其在相同的加热功率下，腔温趋于平衡的时间常数延长，并且平衡温度升高，导致真空中辐射计腔温响应度比空气中明显降低。由于真空环境中黑体腔时间常数和响应度的变化，对于相同的测量目标，真空环境测量的辐射量值与空气中测量值存在0.15%的相对偏差，进而造成了与 WRR 传递标准做地面比对时向 WRR 的修正系数的改变。这项工作有益于更加全面和精确地考察 SIAR 在轨辐射测量量值向地面 WRR 的修正系数和精度，提高不同仪器在轨辐射测量量值的一致性。

**致谢** 感谢禹秉熙老师的指导，感谢叶新、杨东军在 SIAR 方面的研制工作，感谢夏志伟、衣小龙在实验过程中的帮助，感谢许博谦在大气光谱透射率计算方面的工作。

## 参 考 文 献

1 C Fröhlich. Solar irradiance variability since 1978 [J]. Space

Science Reviews, 2006, 125(1-4): 53-65.

- 2 L J Gray, J Beer, M Geller, *et al.*. Solar influences on climate [J]. Rev Geophys, 2010, 48(4): RG4001.
- 3 Chong Wei, Sha Yizhou, Xing Hongyan, *et al.*. A new correction algorithm for diffuse irradiance measured with rotating shadow-band pyranometer based on support vector regression [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0112001.  
崇伟, 沙奕卓, 行鸿彦, 等. 一种基于支持向量机回归的旋转遮光带日射表散射辐照度修正新算法[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112001.
- 4 C Willsonr. Active cavity radiometer [J]. Appl Opt, 1973, 12(4): 810-817.
- 5 C Fröhlich, R Philipina, J Romero. Radiometry at the physikalisch-meteorologisches observatorium Davos and world radiation centre [J]. Opt Eng, 1995, 34(9): 2757-2766.
- 6 Fang Wei, Jin Xifeng. Development of a compensate dual-conical cavity absolute radiometer [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1992, 13(3): 406-411.  
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.
- 7 Fang Wei, Yu Bingxi, Yao Haishun, *et al.*. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 112-116.  
方伟, 禹秉熙, 姚海顺, 等. 太阳辐照度绝对辐射计(SIAR-1)与国际比对[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 112-116.
- 8 Fang Wei, Yu Bingxi, Wang Yupeng, *et al.*. Solar irradiance absolute radiometers and solar irradiance measurement on spacecraft [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(1): 23-28.  
方伟, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 太阳辐照度绝对辐射计及其在航天器上的太阳辐照度测量[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 23-28.
- 9 Wang Hongrui, Fang Wei. Solar irradiance absolute radiometer with ability of automatic solar tracking [J]. Chin J Opt, 2011, 4(3): 252-258.
- 10 Wang Hongrui, Wang Yupeng. Spaceborne radiometer for measuring total solar irradiance [J]. Chin J Opt, 2012, 5(6): 555-565.
- 11 Zhang Zhenduo, Wang Shurong. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum from the solar backscatter ultraviolet spectrometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 061201.  
张振铎, 王淑荣. 星载臭氧垂直探测仪紫外外太阳紫外光谱测量[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 061201.
- 12 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101004.  
杨小虎, 王淑荣, 黄煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101004.
- 13 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Hongzhuang, *et al.*. Study on calibration environment of spectral responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312001.  
张振铎, 王淑荣, 李宏壮, 等. 空间紫外遥感仪器光谱响应度定标环境的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0312001.
- 14 Fang Wei, Wang Yupeng, Yu Bingxi, *et al.*. A Irradiance Measurement Method by Temperature Compensating to the Electrical Calibration Absolute Radiometer; China, 200510016667.1 [P]. 2006-10-04.  
方伟, 王玉鹏, 禹秉熙, 等. 对电校准绝对辐射计进行温度补偿的光辐照度测量方法: 中国, 200510016667.1 [P]. 2006-10-04.
- 15 Yu Bingxi, Yao Haishun, Fang Wei. Rapid measurement method of absolute radiometer by using forecast radiation in electrically

- heating compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 786–790.
- 禹秉熙, 姚海顺, 方 伟. 绝对辐射计预测辐射电补偿的快速测量方法[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 786–790.
- 16 Gong Chenghu, Fang Wei. Software design and implementation for solar irradiance monitor on FY-3A satellite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1476–1482.
- 弓成虎, 方 伟. FY-3A 太阳辐射监测仪的程控设计与实现[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(7): 1476–1482.
- 17 Zhang Jiaqi, Qi Jin, Fang Wei, *et al.*. Correction of observation angle in solar radiation monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0212003.
- 张佳琦, 齐 瑾, 方 伟, 等. 太阳辐射监测仪观测角度变化的修正[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0212003.
- 18 Zheng Xiaobing, Yuan Yinlin, Xu Qiuyun, *et al.*. New reference sources for radiometric calibration [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 101–107.
- 郑小兵, 袁银麟, 徐秋云, 等. 辐射定标的新型参考光源技术[J]. *应用光学*, 2012, 33(1): 101–107.
- 19 World Meteorological Organization. International Pyrheliometer Comparison-XI-Report [ R ]. Davos: Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Centre, 2011.

栏目编辑: 何卓铭