

文章编号 1674-2915(2009)01-0023-06

太阳辐照绝对辐射计及其在航天器上的 太阳辐照度测量

方伟,禹秉熙,王玉鹏,弓成虎,杨东军,叶新

(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)

摘要:介绍了我国自主研发的太阳辐照绝对辐射计(SIARs)的原理和结构,该辐射计主要有两个创新点,即把电加热导线埋入锥腔壁以提高光电等效性和用无源热电温度传感器代替有源电阻温度传感器。SIARs参加了第九届和第十届国际日射(强度)计比对(IPC-IV和IPC-X),同世界辐射基准(WRR)在0.2%以内符合。置于世界辐射中心(WRC)的用于保存和传递WRR的世界标准(辐射计)组(WSG)上的两台SIARs已同WSG仪器进行了6年的比对测量,性能稳定,不确定度在0.2%以内。“神舟三号”飞船应用SIARs构成的太阳常数监测器进行了5个月的在轨测量,与同期国外星上测量数据在0.2%以内吻合。采用3台SIARs构成的“风云三号”卫星太阳辐射监测仪从2008年6月起也开始了长期的在轨测量。

关键词:太阳辐照绝对辐射计;太阳辐照度;在轨测量

中图分类号:P182.2;TH765.2 文献标识码:A

Solar irradiance absolute radiometers and solar irradiance measurement on spacecraft

FANG Wei, YU Bing-xi, WANG Yu-peng, GONG Cheng-hu, YANG Dong-jun, YE Xin

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

Abstract: The working principle and design structure of the Solar Irradiance Absolute Radiometers (SIARs) developed by our research group is introduced. The radiometer offers its two improvements in burying the electrical heater winding into the wall of the cavity to improve the equivalence of electrical and radiative heating and in using thermo-electrical temperature sensor to replace the usual resistance temperature sensor. The SIARs took part in International Pyrheliometer Comparisons (IPC) twice, and calibrated data are coincident well with World Radiometric Reference (WRR). Two SIARs have been put on Physikalisch-Meteorologisches

收稿日期 2008-10-11;修订日期 2008-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40675083)

Observatorium Davos/World Radiometric Center(PMOD/WRC) to observe the sun together with the instruments of World Standard Group(WSG) for six years , and they show stable performance and uncertainty within 0.2% . Moreover , a Solar Constant Monitor(SCM) composed of three wide field of view SIARs mounted on SZ-3 spacecraft has been used to measure solar irradiance for five months , obtained data are coincident with those of ACRIM in 0.2% . From June 2008 , a Solar Total Irradiance Monitor(STIM) made up of three SIARs has also begun to measure total solar irradiance on FY-3 satellite for long term.

Key words : Solar Irradiance Absolute Radiometer(SIARs) ; solar irradiance ; measurement on spacecraft

1 引言

太阳是地球最重要的外部能源 ,是地球天气过程和气候演变的主要驱动力。一个世纪千分之几的太阳辐照度变化是影响气候变化的很重要的因素 ,因此 ,高精度、不间断地监测太阳辐照度将有助于理解太阳的物理过程及其发光度的变化 ,最终能用于有效预测中长期的气候变化^[1]。

基于大气层外太阳辐照度观测已经有了 30 多年的连续记录 ,从 1978 年美国的“ 雨云七号 ”(NIMBUS-7^[2])开始 ,此后的 30 年间 ,欧美国家发射了一系列航天器 ,携带各种不同国家研制的不同类型的绝对辐射计进行了重叠不间断地太阳辐射测量 ,主要包括 :NIMBUS/HF、SMM/ACRIM I^[3]、ERBS/ERBE^[4]、UARS/ACRIM II^[5]、SOHO/VIRGO^[6]、ACRIMSat/ACRIM III^[7]和 SORCE/TIM^[8]等。将各种仪器获得的数据进行了合成 ,得到 TSI 数据^[9]。结果表明 ,在 11 年的太阳周期内 ,太阳辐照度变化了 0.1% ,在太阳活动频繁的短期时段 ,变化达到 0.3%。

因为测量采用了不同类型的仪器 ,操作模式和数据处理方法也不同 ,不便于数据比对 ,因此需要确定统一的度量衡。于是 ,1970 ~ 1975 年世界辐射中心(WRC)用 9 种类型 15 台绝对辐射计进行了比对 ,取其加权平均值建立了世界辐射基准(WRR)^[10] ,用 7 台不同类型的绝对辐射计构成的世界标准组(WSG)来保存和传递 WRR 的辐射量值标度。WSG 经常进行内部比对 ,测量各辐射计的偏差 ,以确保 WRR 的长期稳定性。为了传播 WRR ,以确保世界范围的辐射测量值的一致性 ,WRC 每 5 年举办一次国际日射强度计比

对 ,通过比对实验 ,校正、标定各国的辐射测量仪器。

长春光机所从 60 年代开始进行绝对辐射测量工作 ,研制出了平面型辐射计 ,90 年代又研制出腔型太阳辐照绝对辐射计(SIARs)^[11,12] ,在地面和气球上进行了太阳辐照度的绝对测量 ;同时 ,开发出由 3 台 SIARs 组成的太阳常数监测器 ,在“ 神州三号 ”飞船轨道舱上测得了太阳辐照度数据^[13] ;此外 ,开发的“ 风云三号 ”气象卫星太阳辐照度监测仪^[14~16]也由 3 台相同的 SIARs 组成 ,目前正在进行在轨测量。

2 太阳辐照绝对辐射计(SIARs)

2.1 SIARs 结构原理

绝对辐射计可不依赖于任何辐射标准而直接确定辐射标度。它是热电型探测器 ,通常采用腔型黑体接收器。在接收辐射的器件上设置了电加热丝 ,并使接收器上辐射照射下和电加热下的热效应情况等效 ,用电功率再现的方法自定标辐射标度。绝对辐射计的辐射标度溯源于国际单位制(SI)7 个基本单位的电流基准 ,它已广泛应用于各种光辐射的绝对测量。

长春光机所自主研制的 SIARs 在结构上同国际上同类绝对辐射计相比有两个创新点 (1)把电加热导线埋入银锥腔壁 ,使电功率无其它耗散地全部加热锥腔 ,提高光辐射与电功率加热等效性 (2)用 150 对铜-康铜构成的热电堆作为无源热电温度传感器代替有源电阻温度传感器 ,减少了热抖动。这两点改进并提高了辐射计的绝对精度和稳定性 ,使不确定度达到 0.2% 。

SIARs 结构如图 1 所示 ,由两个制作工艺完

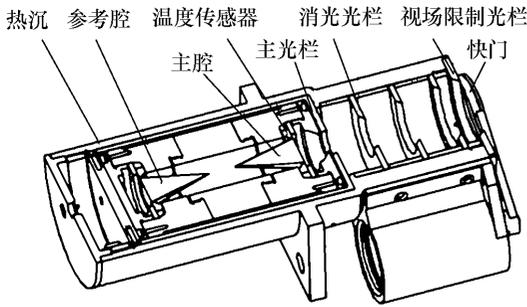


图 1 SIARs 结构图

Fig. 1 Mechanical drawing of SIARs

全相同的锥腔背对背放置,形成对称双腔结构,前腔为工作腔(主腔),接收光辐射,后腔为参考腔,前后腔相互补偿,以抵消热沉温漂的影响。锥腔内表面涂一层镜反射吸收黑,在锥腔壁内双线无感绕制加热丝,锥腔开口处接有铜-康铜热电堆型温度传感器,温度传感器外圆同热沉相连。在主腔前放了一个精密加工并测准面积的主光栏,主光栏和视场光栏之间有消杂光光栏,以减少杂散光进入腔内。快门的两个面镀一层高反射率膜,由步进电机带动。

2.2 国际比对

SIAR-1 和 SIAR-2c 参加了第九届和第十届国际日射(强度)计比对(IPC-IV 和 IPC-X)^[17,18],获得了相对于世界辐射基准的修正系数,分别是 1.001 928 和 1.000 016, 1σ 分别为 0.000 817 和 0.000 934,见图 2 和图 3。

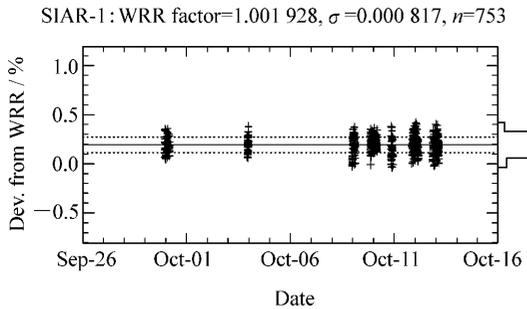


图 2 SIAR-1 在 IPC-X 的比对结果

Fig. 2 Comparison results of SIAR-1 on IPC-X

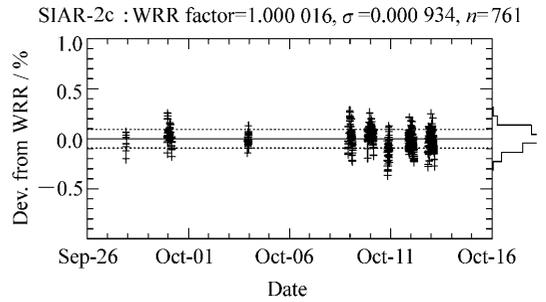


图 3 SIAR-2c 在 IPC-X 的比对结果

Fig. 3 Comparison results of SIAR-2c on IPC-X

心(PMOD/WRC)的需求,同时也为了考核 SIARs 的长期稳定性,课题组于 2002 年 8 月研制了 SIAR-2a、SIAR-2b 两台 SIARs,置于保存和传递 WRR 的 WSG 上,见图 4。至今两台仪器已在 WRC 同 WSG 仪器进行了 6 年的比对测量,仪器

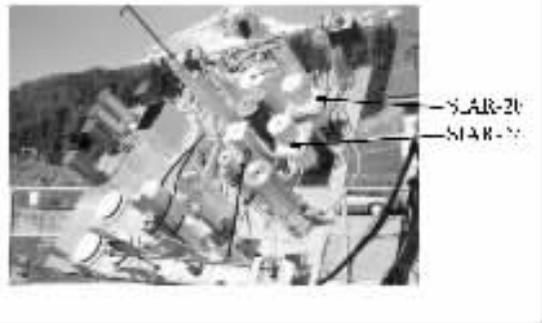


图 4 SIARs 同 WSG 仪器比对

Fig. 4 Comparison of SIARs with instruments of WSG

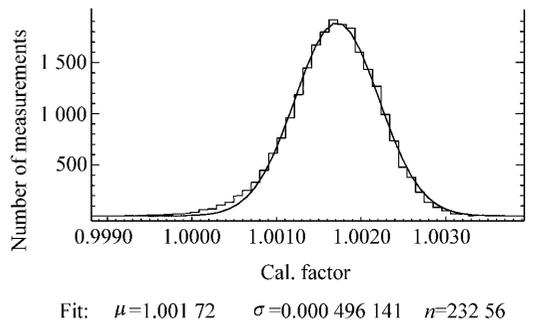
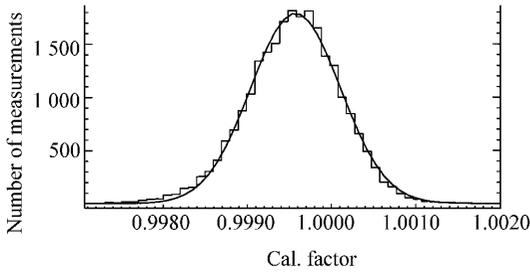


图 5 SIAR-2a 在 WRC 的长期考核结果

Fig. 5 Examined results of SIAR-2a at WRC

数分别为 1.001 72 和 0.999 57, 1σ 分别为 0.000 496和 0.000 535, 见图 5 和图 6。



Fit: $\mu=0.999\ 572$ $\sigma=0.000\ 535\ 017$ $n=244\ 87$

图 6 SIAR-2b 在 WRC 的长期考核结果

Fig.6 Examined results of SIAR-2b at WRC

WRC 给出的评价报告结论: “The technical reliability makes the SIAR instruments promising candidates for the WSG”。

3 “神舟三号”飞船太阳常数测量

“神舟三号”飞船太阳常数监测器由 3 台相同的半视场为 7.5° 的 SIARs 依次成 15° 扇形排列构成^[13], 在飞船轨道舱的朝天面上, 3 台辐射计所在平面同飞船飞行方向垂直安装, 在飞船轨道面上形成 $\pm 22.5^\circ$ 的观测太阳的视场, 见图 7。测量方法采用了在飞船扫过视场期间进行太阳辐照度测量的非跟踪太阳的测量方法^[14]。2002 年 3~7 月“神舟三号”飞船太阳常数监测器进行了半年的在轨测量, 图 8 为半年获得的太阳常数数据,



图 7 “神舟三号”飞船太阳常数监测器

Fig.7 Solar Constant Monitor on SZ-3 spaceship

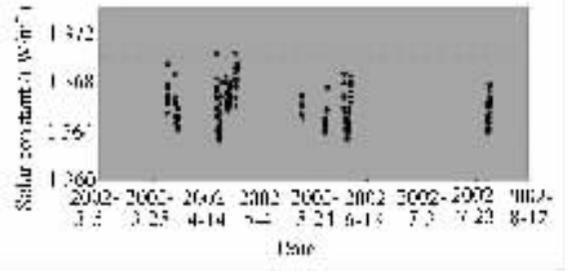


图 8 “神舟三号”飞船获得的太阳常数数据

Fig.8 Data of TSI from SZ-3 spaceship

测得的太阳常数值同世界气象组织(WMO)推荐值(1367 W/m^2)偏差 $< 0.2\%$, 同美国 EOS 卫星 ACRIM3 同期数据最大偏差 $\leq 0.2\%$ 。

4 “风云三号”卫星太阳辐照度测量

“风云三号”卫星太阳辐射监测仪^[15-16]也采用 3 台相同的 SIARs 构成其 3 通道: AR1、AR2 和 AR3。3 通道轴线与卫星 X 轴分别成 22° 、 27° 、 32° 夹角, 与卫星 -Y 轴成 68° 、 63° 、 58° 夹角, 如图 9 所示。在卫星上将仪器朝向卫星飞行方向安装, 在太阳扫过辐射计视场期间进行太阳辐照度测量。“风云三号”卫星采用的是极轨道太阳同步气象卫星, 轨道周期 102 min, 每轨道可进行一次太阳辐照度测量。星上测量时 AR1 和 AR3 两台长期测量, AR2 定期测量, 以便校正由于锥腔暴露在强紫外照射下引起的腔黑吸收率等的下降。

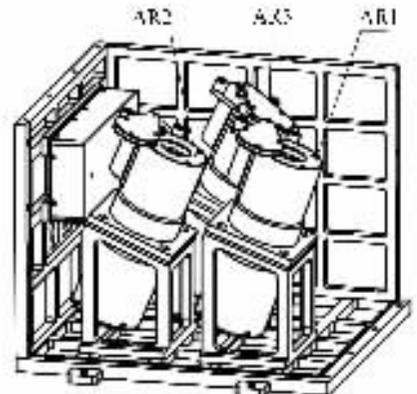


图 9 “风云三号”卫星太阳辐射监测仪结构

Fig.9 Mechanical drawing of Solar Irradiance Monitor on FY-3 satellite

太阳辐射监测仪于 2008 年 6 月 4 日开机,对获得的数据进行了角度、日地距离、冷空间等修

正,初步处理后的结果见图 10,处理后的值在 WMO 推荐的 $(1\ 367 \pm 7)\text{ W/m}^2$ 范围内。

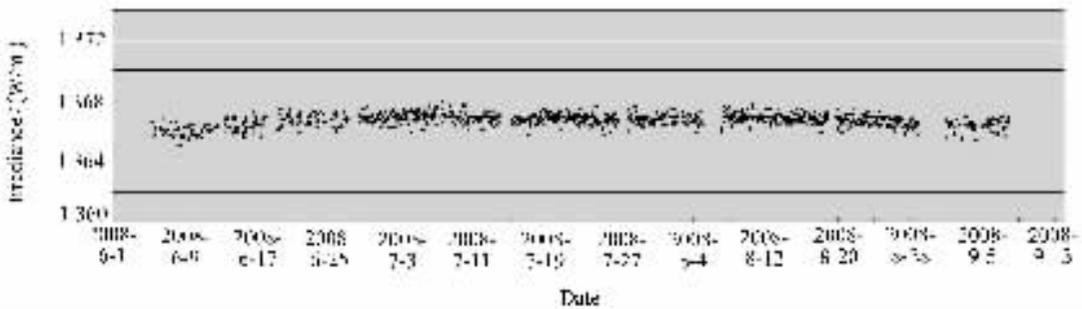


图 10 “风云三号”卫星太阳辐射监测仪在轨测试初步结果

Fig. 10 Data of TSI from Solar Irradiance Monitor on FY-3 satellite

5 结 论

经过了 20 年的研制与不断改进,SIARs 在不断完善与提高,与世界辐射基准的比对、在 WSG 上的考核,以及“神舟三号”飞船和“风云三号”卫星在轨太阳辐照度测量结果表明,SIARs 是有中国特色的绝对辐射计,绝对辐射计不确定度低,与世界同类仪器符合良好,达到国际同类仪器的先进水平,将在国际绝对辐射测量领域占有一席之地。但如果要满足微小变化的太阳辐照度长期精确监测的需求,还有很多细致的工作要做,还有很多项影响因子在十万分之几到百万分之几的校正因子需要进行精确分析与测定。

为了研究太阳辐照度微小变化及其规律,需

要各种高精度和稳定性的测量仪器同时进行连续重叠监测。目前在空间正在测量太阳辐照度的仪器有欧空局 VIRGO 上的瑞士的 PMO6 和比利时的 DIARAD、美国 SORCE 上的 TIM 和中国“风云三号”卫星上的 SIARs。相信通过长期测量与不同卫星上不同类型仪器的相互比对,定会使我国的绝对辐射测量工作上新台阶,把我国 SIARs 的在轨测量结果纳入世界长期太阳辐照度测量序列之中,达到真正与世界接轨。现在正值太阳活动低谷,积累数据处理经验,以保证在下一个太阳活动峰年能进行高精度、连续的太阳辐射监测,将对研究太阳辐照度变化规律、趋势,解释和预测对地球系统的影响,进一步理解地球系统,应用地球科学提高对气候、天气、和自然灾害的预报,增强人类对外界变化的计划与反应能力,都具有重大的经济、历史和政治意义。

参考文献:

- [1] HANSEN J E ,LACIS A ,RIND D *et al.* . Climate sensitivity analysis of feedback mechanisms[C]. Climate Processes and Climate Sensitivity. Washington :American Geophysical Union ,1984.
- [2] HICKEY J R ,ALTON B M ,KYLE H L. Total solar irradiance measurements by ERB/Nimbus 7 ,a review of nine years [J]. *Space Sci. Rev.* ,1988 ,48 321-342.
- [3] WILLSON R C. Solar total irradiance observations by active cavity radiometers[J]. *Sol. Phys.* ,1981 ,74 217-229.
- [4] ROBERT B L ,BRUCE R B ,ROBERT D C. Characteristics of the earth radiation budget experiment solar monitors[J]. *Appl. Opt.* ,1987 26(15) 3090-3096.
- [5] MECHERIKUNNEL A. A comparative study of solar total irradiance measured by active-cavity radiometers[J]. *Metrologia* ,1993 ,30 271-273.
- [6] FROHLICH C ,PHILIPONA R ,ROMERO J *et al.* . In-flight performance of the Virgo solar irradiance instruments on SOHO[J]. *Sol. Phys.* ,1997 ,175 267-286.

- [7] WILLSON R C. The ACRIMSAT/ACRIM3 experiment-extending the precision ,long-term Total Solar Irradiance climate databas[e J]. *The Earth Observer* 2001 ,13 ,14-17.
- [8] LAWRENCE G M. Solar Total Irradiance Monitor(TIM) [J]. *Metrologia* 2000 ,37 #07-410.
- [9] WHITE O R ,ROTTMAN G J. Solar variability observations[J]. *Space Sci. Rev.* 2000 ,94 93-97.
- [10] FROHLICH C ,PHILIPONA R ,ROMERO J. Radiometry at the Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Cent[J]. *Opt. Eng.* ,1995 ,34(9) 2757-2766.
- [11] 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 Solaris Sinica* ,1992 ,13(3) #406-411.(in Chinese)
- [12] 方伟 ,禹秉熙 ,姚海顺 ,等. 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 SH *et al.* . Solar Irradiance absolute radiometer and international comparison[J]. *Acta Optica Sinica* 2003 ,23(1) :112-116.(in Chinese)
- [13] 禹秉熙 ,方伟 ,姚海顺 ,等. 神舟三号飞船上太阳辐射测量 [J]. *空间科学学报* 2004 ,24(2) :119-123.
YU B X ,FANG W ,YAO H SH *et al.* . Solar irradiance measurement on Shenzhou-3 spacecraft[J]. *Chinese J. Space Sci.* 2004 ,24(2) :119-123.(in Chinese)
- [14] 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]. *Opt. and Precision Eng.* 2004 ,12(4) 353-358.(in Chinese)
- [15] 徐博明. 气象卫星有效载荷技术 [M]. 北京 :中国宇航出版社 2005.
XU B M. *Efficiency Load Technology on Weather Satellite* [M]. Beijing :Publishing Company on Space Navigation 2005.(in Chinese)
- [16] FANG W ,YU B X ,YAO H SH *et al.* . Development of STIM [J]. *SPIE* 2002 ,4895 218-224.
- [17] International Pyrheliometer Comparison IPC-IX [C]. Davos ,Switzerland. Results and Symposium. Working Report No. 197 ,MetroSwiss ,Davos and Zurich 2000.
- [18] WMO International Pyrheliometer Comparison IPC-X [C]. Davos ,Switzerland. Final Report. IOM Report No. 91 ,WMO/TD No. 1320 ,PMOD/WRC Internal Report ,Davos 2005.

作者简介 :方伟 (1965—) ,女 ,理学博士 ,研究员 ,主要从事绝对辐射测量技术、航天光学遥感仪器等方面的研究。

E-mail fangw@ciomp.ac.cn