文章编号 1004-924X(2016)10-2370-07

太阳辐照度绝对辐射计的光电不等效性修正

唐 潇[1,2],贾 平[1],王 凯[1],宋宝奇[1],方 伟[1*],王玉鹏[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:针对绝对辐射计光电不等效性来源复杂、实验测量难度大的特点,提出了修正太阳辐照度绝对辐射计(SIAR)光电不等效性的有限元单元法。结合 SIAR 的测量方法,对真空中辐射计的腔温响应进行了实验测试。基于有限元单元法,建立了与实验腔温度响应相对误差仅为 0.14%的有限元模型,对接收腔的温度响应进行了实验测试。测试结果显示:入射光功率为 73.8 mW 时,接收腔与热沉之间的温度差异约为 0.85 K,响应的时间常数为 29.8 s。运用建立的有限元模型对 SIAR 的光电不等效性进行了评估和修正。结果表明:太阳辐照度绝对辐射计的光电不等效性来源主要为不同加热途径和不同加热区域引起的偏差,SIAR 的光电不等效性因子 N 为 0.999 621±0.000 004。该修正模型完善了仪器的修正体系,提高了测量精度,为绝对辐射计的发展提供了可靠的数据来源。

关 键 词:太阳辐照度绝对辐射计;有限元单元法;光电不等效性;温度响应
中图分类号:P414.51;TP732 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20162410.2370

Non-equivalence correction of solar irradiance absolute radiometer

TANG Xiao[1,2], JIA Ping[1], WANG Kai[1], SONG Bao-qi[1], FANG Wei[1*], WANG Yu-peng[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: fangw@ciomp.ac.cn*

Abstract: As the non-equivalence of absolute radiometers has complex sources and it is difficult to be measured, this paper proposes the finite element method to correct the non-equivalence of a Solar Irradiance Absolute Radiometer (SIAR). On the basis of the measuring method the SIAR, the nonlinear thermal dynamic response of the cavity in vacuum was tested. A finite element model with a relative error of 0.14% for an experimental cavity was established based on the finite element method to test the temperature response of the receiving cavity. The experimental results show that the temperature difference between the receiving cavity and the heat sink is approximately 0.85 K and the time constant is 29.8 s when input optical power is 73.8 mW. The finite element method was employed to estimate and correct the non-equivalence of the absolute radiometer. It indicates that the source of non-equivalence of SIAR mainly comes from the drifts driven by different heating paths and areas, and the

收稿日期:2015-10-16;**修订日期**:2015-12-10.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41474161);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA123703)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

correctional factor of non-equivalence for the SIAR is 0.999 621±0.000 004. The finite element correct model completes the correctional system of SIAR and significantly increases the accuracy of the SIAR. It is helpful to improve the future design of absolute radiometers.

Key words: Solar Irradiance Absolute Radiometer (SIAR); finite element method; non-equivalence; temperature response

1 引　言

太阳作为地球最重要的外部能量来源，它的任何微小变化都会引起地球辐射收支能量的改变，并最终引起地球环境和气候状况的变化，故在世界范围内对太阳辐照度进行长期、连续、精确的监测是非常必要的工作。我国开展了太阳辐照度绝对辐射计(Solar Irradiance Absolute Radiometer，SIAR)的研制工作[1-5]。SIAR 为电替代辐射计，其工作原理是利用光电等效性，用可精确测量的电功率复现入射的辐射光功率，电功率的功率值即为光功率的测量值。该辐射计于 2013 年 9 月 23 日搭载 FY-3C 号卫星进入太空对太阳辐照度进行持续监测。监测数据表明在波长为 0.2～50 内，SIAR 的灵敏度为 0.2 W/m^2，相对不确定度小于 550 ppm (per parts million)[6]。然而，在实际测量过程中，绝对辐射计光加热和电加热阶段并不是绝对等效的。不同国家研制的辐射计由于腔体结构和组成不同，引起光电不等效性的主要来源也不同。对光电不等效性的来源进行精确的定量评估从而完善仪器的测量体系，是当前绝对辐射计精度提高和优化设计的关键问题。

近期空间中工作的高精度绝对辐射计主要有 Physikalisch Meteorologisches Observatorium Radiometer (PMOR)[7]，Dual Irradiance Absolute Radiometer (DIARAD)[8] 以及 Total Irradiance Monitor (TIM)[9-11]。其中，PMOR[7] 系列辐射计采用倒置的圆锥腔结构，光功率照射时，未被吸收的辐射反射到封装的圆柱型腔体部分，一次反射的残余能量使得光电加热区域存在差异。Brusa 和 Frohlich[7] 对 PMOR 辐射计的空气-真空光电不等效性进行了对比，采用光加热空气-真空响应比减去电加热空气-真空响应比的方法，得到 PMOR 辐射计在空气中工作时的光电不等效性的修正系数为 0.15%～0.45%。DIARAD[8] 辐射计采用平底面的接收腔结构，其底面涂有漫反射吸收黑以减少镜面反射造成的光功率能量逸出。其光电不等效性来源为不同加热面积形成的偏差，即光功率的加热面积比电加热丝的加热面积小一半，不同的加热面积造成了光加热和电加热阶段不同的腔温响应。Mekaoui 和 Dewitte[12] 对 DIARAD 的不等效性进行了表征，利用激光对辐射计的平底面进行扫描，采集了对应位置的腔温响应，以此响应为基础给出了等效的光加热功率。通过对比等效的光加热功率与电加热功率，得到了 DIARAD 的光电不等效性修正值。TIM[9-11] 辐射计采用圆锥腔型接收腔结构，在光功率直接照射区域缠绕加热丝，且采用加热丝埋入银锥腔工艺，使得光加热和电加热的加热面积几乎一致。其光电不等效性的来源主要为传热途径的差异。光加热阶段光功率需照射在吸收黑上，然后通过银锥腔传递到热沉；而电加热直接通过加热丝与银锥腔相连，电功率更迅速地与热沉进行热交换。Kopp 和 Lawrence[9] 通过计算光功率和电功率不同加热途径对应的热阻和，以和的比值来修正光电不等效性。

综上所述，实验测量绝对辐射计的光电不等效性修正比较困难，而且只能给出不等效性的近似值，并不能定量测量光加热和电加热的温度分布情况和不等效性。此外，Z. M. Zhang[13-14] 等在对美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology，NIST) 的绝对辐射计进行性能测试时发现，运用有限元单元法在绝对辐射计的稳态结果测量和瞬态响应预估方面有很大优势。相对于以往的实验测量和理论计算方法，有限元单元法具有灵活性和有效性，并已经成为处理复杂模型的最有效方法。因此本文结合 SIAR 的测量方法，在对真空中辐射计的腔温响应进行实验测试的前提下，采用有限元单元法建立了与实验腔温响应数据对比最大相对误差仅为 0.14% 的有限元模型，并用此模型完成了对 SIAR 光电不等效性的修正。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 辐射计的结构组成

太阳辐照度绝对辐射计的结构如图1所示。辐射计有两个通道，用来对运行过程中的退化以及其他因素带来的偏差进行修正。通道1和通道2呈对称性结构，每一个通道都由接收腔、参考腔、热电堆和热沉4部分组成。接收腔为圆锥型腔，中心角为30°，半径为7.5 mm，高度为24.3 mm，腔壁厚度为0.1 mm。接收腔的内表面涂有黑漆，黑漆的高吸收率以及光束在接收腔内的多次反射使得接收腔的吸收效率接近于1。参考腔与接收腔的结构相同，用来消除热沉温度漂移引入的温度误差。热电堆由180对铜-康铜金属丝缠绕而成，运用热电效应测量热沉与接收腔之间的温度差异。热沉为铝制的圆柱型金属块，将接收腔和参考腔同时封装在内，并与光加热和电加热产生的热量进行热交换使接收腔的温度趋于平衡。

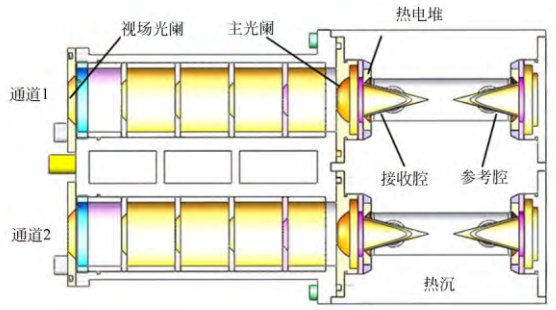

图1 太阳辐照度绝对辐射计的结构图

Fig. 1 Schematic diagram of Sun Irradiance Abosulate Radiometer(SIAR)

3 测试结果与结果分析

3.1 SIAR腔温响应测试

SIAR在打开快门加光测量阶段采用快速测量快速预测的方法[15]，其测量过程分为自测试、光加热和电定标3个阶段。

在自测试阶段，首先关闭快门，在辐射计的接收腔依次施加高功率 P_1 和低功率 P_2，并分别持续5 min，获得相对应的接收腔温升 T_1 和 T_2。对比不同温升，计算出接收腔的功率响应度 $S=(P_1-P_2)/(T_1-T_2)$。在光加热阶段，打开快门，为保证加光测量时接收腔的温升不发生较大变化，在打开快门时接收腔施加低功率 P_3。接收腔吸收的光功率 P_0 和施加的低功率 P_3 使接收腔的温度升高平衡在 T_3。在电定标阶段，关闭快门，通过自测试阶段测得的响应度 S 计算出使腔温升高 T_3 需施加的电功率 P_4。由于光加热和电加热的温升并不能完全一致，电功率为 P_4 时腔温实际升高了 T_4。由此，被吸收的光功率为：

$$P_0=P_4-P_3-S(T_4-T_3). \tag{1}$$

结合接收腔的吸收率 α，主光阑的面积 A 和辐射计的光电不等效因子 N，测量的光功率辐照度为：

$$E=\frac{NP_0}{\alpha A}. \tag{2}$$

3.2 SIAR腔温响应的测试结果

实验测试了在典型入射光功率为73.8 mW照射的情况下，SIAR在高真空环境中(压强小于 1×10^{-5} Pa)接收腔的温度响应，如图2所示。在采样时间为5 min的周期内，接收腔吸收加热功率后，温度会缓慢升高直至平衡。此过程中接收腔温度响应的时间常数是快速预测电补偿方法的重要参数。根据Fox和Rice[16]对绝对辐射计时间常数的定义，对图2中的数据进行单幂指数拟合，SIAR辐射计在入射光功率为73.8 mW的时间常数为29.8 s。

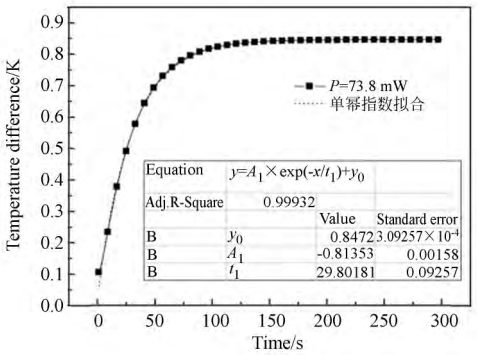

图2 入射光功率为73.8 mW时接收腔的温度响应

Fig. 2 Temperature difference in cavity with input optical power of 73.8 mW

4 辐射计传热系统有限元模拟分析

4.1 辐射计传热系统有限元模型

本文采用有限元软件ANSYS对绝对辐射计

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的接收腔-热沉传热系统进行了模拟分析，模拟主要分析传热过程的热传递。由于辐射计运行在高真空和常温环境中，接收腔与外界的热对流和热辐射被忽略。热沉的温度通过可控的伺服系统稳定在 300 K。接收腔、参考腔、热电堆、热沉以及起固定作用的压片（材料为铝）和导热环（材料为聚酰亚胺）的热物理属性可参照文献[17-18]。

基于经典的热力学傅里叶定律，结合辐射计的实际结构，对 SIAR 的结构和物理属性进行了以下简化：(1)辐射计运行在高真空环境下，相对热沉与锥腔之间的热传导，热沉、锥腔等结构与空气之间的热对流极小，在本次模拟中予以忽略。(2)热沉与锥腔之间通过热传导传递的热量为：

$$Q_C=\lambda A(T_r-T_{HS})/L\ , \tag{3}$$

接收腔与热沉之间热辐射传递的能量为：

$$Q_r=\varepsilon\sigma A_r(T_r^4-T_{HS}^4)\ , \tag{4}$$

其中：T_r，T_{HS} 分别为接收腔和热沉的温度，σ 和 ε 分别为斯特凡玻尔兹曼常量和接收腔的发射率，λ，A 和 L 分别为热电堆的热导率、横截面积和长度，A_r 为接收腔的辐射照射面积。经过计算，Q_C 与 Q_r 的比值大致为 9.5×10^2，故在有限元体系中不考虑接收腔与热沉之间通过热辐射传递的能量。

简化后建立了辐射计的传热系统模型。该模型由 23 404 个节点和 18 840 个单元组成。在热分析过程中，各节点的温度由 ANSYS 的运行法则决定，即有：

$$(\boldsymbol{C})\{\dot{\boldsymbol{T}}\}+(\boldsymbol{K})\{\boldsymbol{T}\}=\{\dot{\boldsymbol{Q}}\}\ , \tag{5}$$

其中：$\boldsymbol{T}$ 和 $\dot{\boldsymbol{T}}$ 代表节点温度的向量和它的时间微分，$\boldsymbol{C}$ 和 $\boldsymbol{K}$ 分别为热容和热导的矩阵。因为没有内部的热生成，加热功率向量 $\dot{\boldsymbol{Q}}$ 代表着通过边界的热流。运用该非线性矩阵方程能够在模型中求解温度与热容及热导的关系。

4.2　模型分析与实验对比

为了确保有限元模型的精确性，对模型的接收腔灵敏度进行了测试并与实验结果进行对比。将不同的光功率由低到高依次施加在接收腔的照射区域，由热电堆的热电效应测得热沉与接收腔之间的温度差异，将该数值与模拟的腔温响应结果进行对比，结果如图 3 所示。观察图 3 发现热沉与接收腔之间的温度差异与入射功率呈良好的线性关系，该线性关系是测量原理中式(1)能够成立的基础，且模拟数据与实验数据之间的最大相对误差仅为 0.14%。由此说明建立的模型与绝对辐射计的实际运行情况具有一致性，能够用来修正 SIAR 的光电不等效性。结合文献[19]分析 SIAR 的不确定度，得表 1。

表 1　SIAR 的不确定度分析

Tab. 1　Uncertainties in SIAR measurement

参数	相对不确定度/ppm	绝对不确定值
E(原始测量)	510	0.664 W/m^2
E_b(背景冷空间辐射)	1 354	0.281 W/m^2
N_1(日地远距离修正)	200	2.058×10^{-4}
N_2(太阳指向性修正)	700	7.039×10^{-4}
N_3(溯源性修正)	100	9.967×10^{-5}
N(光电不等效性修正)	1 4001	395×10^{-3}

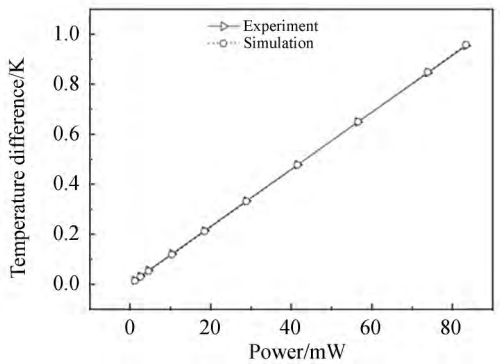

图 3　不同入射功率下接收腔的温度差异以及与仿真的对比

Fig. 3　Variation of temperature difference of absolute radiometer with input power and its comparison with FE model data

5　SIAR 光电不等效性

5.1　SIAR 光电不等效性来源

对比其它辐射计，SIAR 的设计借鉴了 TIM 辐射计的结构，即同为圆锥腔型接收腔且采用加热丝埋进银腔的工艺以减少加热丝向外传递热量，光束在接收腔内多次反射引起的梯度变化以及加热丝线阻的能量流失被忽略。故 SIAR 光电不等效来源主要为不同加热途径以及不同加热面积带来的偏差。

SIAR 在光加热阶段和电加热阶段的不等效示意图如图 4 所示。不同加热途径的来源与 TIM 辐射计类似，即光加热施加在黑漆层，而电

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

加热施加在加热丝层。此外，由于加热丝加工工艺的限制，靠近加热丝尖端缠绕加热丝相对困难，工艺难以实现，一般情况下工艺能够实现 $x<3$ mm[20]。

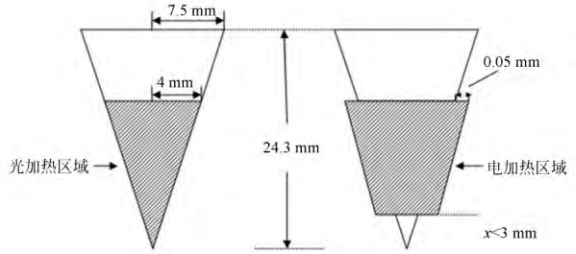

图4 SIAR的光加热和电加热不等效示意图

Fig. 4 Schematic diagram of photoelectric non-equivalence of SIAR

5.2 SIAR光电不等效性修正

根据SIAR光电不等效性的来源，采用有限元单元法软件中的APDL（ANSYS Parametric Design Language）语言对接收腔的墙壁进行切割，形成相隔0.5 mm的加热丝层和黑漆层。此外，旋转工作平面对横截面 $x=3$ mm处进行切分，从而在有限元体系中建立了与图4实际情况相符的有限元模型。将不同光功率和电功率依次施加在接收腔的不同层面和不同加热面积上，对比电加热和光加热在相同功率情况下的不同腔温响应，得到光电不等效性的修正系数为0.037%～0.04%（SIAR的总测量精度为0.1%），如表2所示。由文献[6]和[21]可知，SIAR搭载FY-3C卫星对太阳辐照度进行测量，辐射计与背景冷空间的辐射交换为 -20.57 W/m^2，测量的初始数据为1 302.84 W/m^2，经过日地距离以及背景冷空间辐射等修正后的TSI值约为1 365.62 W/m^2。由表2可知，在光功率和电功率的相同边界条件下，光加热的温升略高于电加热。此外，由前文结论可知，热沉与接收腔之间的温度差异与入射功率呈良好的正比例线性关系。故在实际测量过程中，光加热阶段和电加热阶段取相同温差为基准时，精确测量的电功率会略大于入射光功率。结合表1中的修正系数，运用误差分析得到辐射计的光电不等效性因子为：

$$N=0.999\ 621\pm0.000\ 004. \tag{4}$$

则太阳辐照度绝对辐射计修正后的TSI测量值为（1 365.10±1.24）W/m^2。TIM由于具有精密的结构设计以及严谨的不确定度分析已成为太阳辐照度测量的基准，而Kopp and Lean[22]对TIM进行精确测量后发现相对于20世纪90年代设立的标准值，TIM测得的TSI值更小。故对SIAR进行光电不等效性修正后，TSI值将更趋于太阳辐照度的真值，SIAR的测量体系更为完善，测量精度也更高。

表2 SIAR光电不等效性的相对修正系数

Tab. 2 Relative correctional factors of photoelectric non-equivalence of SIAR

功率/mW	电加热温升/K	光加热温升/K	修正系数/10^{-4}
1.147	0.013 182	0.013 187	3.79
2.586	0.029 718	0.029 729	3.70
4.605	0.052 923	0.052 944	3.97
10.370	0.119 176	0.119 221	3.77
18.454	0.212 078	0.212 158	3.77
28.843	0.331 473	0.331 598	3.77
41.533	0.477 309	0.477 490	3.79
56.539	0.649 763	0.650 010	3.80
73.843	0.848 131	0.848 452	3.78
83.362	0.958 020	0.958 382	3.78

6 结 论

太阳辐照度的精确测量需要对绝对辐射计的光电不等效性进行系统的修正。本文采用有限元单元法，结合SIAR真空环境下的接收腔温度响应数据，建立了SIAR接收腔-热沉传热系统的热模型，对不同加热途径和不同加热区域引起的光电不等效性进行了修正。测试结果显示，不同加热功率下SIAR的光电不等效性因子 N 为0.999 621±0.000 004。该结论减少了太阳辐照度的测量值，与TIM辐射计的监测结果一致，说明本文采用的修正方法可以满足绝对辐射计数据处理的要求，提高了测试精度。此外，真空环境下的实验结果表明，接收腔吸收加热功率后温度缓慢上升直至平衡，在5 min的采样周期中SIAR接收腔达到平衡的时间常数约为29.8 s。本研究可为绝对辐射计的性能提高和优化设计提供参考。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] **方伟，王玉鹏. 紫外辐照对绝对辐射计锥腔吸收率的影响**[J]. **光学 精密工程**，2006，14(5)：775-780.
FANG W, WANG Y P. Influence of UV radiation on absorptivity of cavity of absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 775-780. (in Chinese)

[2] **王玉鹏，方伟，弓成虎，等. 双锥腔互补偿型绝对辐射计**[J]. **光学 精密工程**，2007，15(11)：1662-1667.
WANG Y P, FANG W, GONG CH H, *et al.*. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1662-1667. (in Chinese)

[3] **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.
GONG CH H, FANG W. Software design and implementation for solar irradiance monitor on FY-3A satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1476-1482. (in Chinese)

[4] **王红睿，方伟. 自动寻日的太阳辐照绝对辐射计**[J]. **中国光学**，2011，4(3)：252-258.
WANG H R, FANG W. Solar irradiance absolute radiometers and solar irradiance measurement on spacecraft [J]. *Chin. Opt.*, 2011, 4(3): 252-258. (in Chinese)

[5] **王红睿，王玉鹏. 用于测量太阳总辐射的空间辐射计**[J]. **中国光学**，2012，5(6)：555-565.
WANG H R, WANG Y P. Spaceborne radiometer for measuring total solar irradiance [J]. *Chin. Opt.*, 2012, 5(6): 555-565. (in Chinese)

[6] FANG W, WANG H R, LI H D, *et al.*. Total solar irradiance monitor for Chinese FY-3A and FY-3B satellites-instrument design [J]. *Sol. Phys.*, 2014, 289: 4711-4726.

[7] BRUSA R W, FROHLICH C. Absolute radiometers (PM06) and their experimental characterization [J]. *Appl. Opt.*, 1986, 25(22): 4173-4180.

[8] FROHLICH C, ROMERO J, ROTH H. Experiment for helioseismology and solar irradiance monitoring [J]. *Sol. Phys.*, 1995, 162(1): 101-128.

[9] KOPP G, LAWRENCE G. The Total Irradiance Monitor (TIM): Instrument design [J]. *Sol. Phys.*, 2005, 230: 91-109.

[10] KOPP G, HEUERMAN K, LAWRENCE G. The Total Irradiance Monitor (TIM): Instrument calibration [J]. *Sol. Phys.*, 2005, 230: 111-127.

[11] KOPP G, LAWRENCE G, ROTTMAN G. The Total Irradiance Monitor (TIM): Science results [J]. *Sol. Phys.*, 2005, 230: 129-139.

[12] MEKAOUI S, DEWITTE S, CROMMELYNCK D, *et al.*. Absolute accuracy and repeatability of the RMIB radiometers for TSI measurements [J]. *Sol. Phys.*, 2004, 224(1-2): 237-246.

[13] ZHANG Z M, DATLA R U, LORENTZ S R, *et al.*. Thermal modeling of absolute cryogenic radiometers [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1994, 116: 993-998.

[14] ZHANG Z M, LIVIGNI D J, JONES R D, *et al.*. Thermal modeling and analysis of laser calorimeters [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1996, 10: 350-356.

[15] **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.
YU B X, YAO H SH, FANG W. Rapid measurement method of absolute radiometer by using forecast radiation in electrically heating compensation [J]. *Acta Optica Sin.*, 2005, 25(6): 786-790. (in Chinese)

[16] FOX N P, RICE J P. Absolute radiometers [C]. *Experimental Methods in the Physical Science*, *Gaithersburg*, *America*: *Elsevier Inc*, 2005: 35-96.

[17] TOULOUKIAN Y S, POWELL R W, HO C Y, *et al.*. *Thermophysical Properties of Matter* (*Vol.* 1) [M]. New York: IFI/Plenum press, 1970.

[18] TOULOUKIAN Y S, POWELL R W, HO C Y, *et al.*. *Thermophysical Properties of Matter* (*Vol.* 4) [M]. New York: IFI/Plenum press, 1970.

[19] WANG H R, LI H D, QI J, *et al.*. Total solar irradiance monitor for Chinese FY-3A and FY-3B satellites—space experiments and primary data correction [J]. *Solar Phys.*, 2015, 290: 645-655.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[20] 方茜茜. 空间低温辐射计黑体腔与光电不等效性研究[D]. 北京:中国科学院大学,2014.
FANG Q Q. *Research of the Blackbody Cavity and nonequivalence of Spatial Cryogenic Radiometer* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences,2014. (in Chinese)

[21] 杨东军,方伟,叶新,等. 星载太阳辐射监测仪的高精度太阳跟踪[J]. 光学 精密工程,2014,22(9):2483-2490.
YANG D J, FANG W, YE X, *et al*.. High precision sun-tracking of spaceborne solar irradiance monitor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2483-2490. (in Chinese)

[22] KOPP G, LEAN J. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38: L01706.

作者简介:

唐 潇(1990—),男,湖南永州人,博士研究生,2012年于兰州大学获得学士学位,主要从事绝对辐射计光电不等效性和热模型方面的研究。E-mail: tangxiao1022@126.com

通讯作者:

方 伟(1965—),女,辽宁锦州人,博士,研究员,1997年和2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,现为FY-3卫星太阳辐照度绝对辐射计主任设计师,主要从事太阳辐射计量的研究。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net