

绝对辐射计一次反射不等效的影响及实验分析

唐 潇^{1,2} 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 为了提高星载光辐射测量精度,满足在轨测量数据向世界辐射参考标准溯源的需求,运用有限元单元法对太阳辐照度绝对辐射计(SIAR)的光电不等效性进行修正。SIAR采用典型的正圆锥腔结构及加热丝直接埋入银锥腔工艺,其光电不等效性源于激光加热照射时一次反射引起的偏差。针对该偏差定量修正难度较大的特点,结合SIAR腔组件的实际结构,建立与实验测量结果最大相对误差仅为0.86%的有限元体系,并运用该体系对SIAR的光电不等效性进行定量修正。修正结果表明,光束的一次反射引起了激光加热和电加热阶段的不同功率分布,其光电不等效性因子为1.0000589,不确定度为 3.4×10^{-6} 。运用该因子对测量数据进行修正,得到SIAR的太阳总辐照度实际测量结果为 $(1365.70 \pm 1.24) \text{ W/m}^2$ 。该修正完善了绝对辐射计的修正体系。

关键词 测量; 太阳总辐照度; 有限元单元法; 光电不等效性; 世界辐射标准

中图分类号 TP732

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0408003

Effect and Experiment Analysis of First Specular Reflection Error on Absolute Radiometers

Tang Xiao^{1,2} Fang Wei¹ Wang Yupeng¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to enhance the measurement accuracy of spaceborne solar irradiance and make its traceability value closer to the world radiometric reference, a finite element method is used to correct the opto-electric nonequivalence of solar irradiance absolute radiometers (SIAR). The positive cone cavity is used in the SIAR and the heating wires are embedded into the thin walls. Thus, the opto-electric nonequivalence of SIAR is mainly derived from the drift driven by the first specular reflection. As it is difficult to measure the error in laboratory, the finite element system based on the structure of SIAR is established to quantitatively correct the nonequivalence, the relative error between the results obtained by the experiment and the finite element system is 0.86%. The results show that the power distribution of laser heating and electric heating is different due to the drift driven by the first specular reflection, the nonequivalence factor is 1.0000589, and the uncertainty is 3.4×10^{-6} . The radiant power measurement is modified according to this factor, and the final total solar irradiance value is $(1365.70 \pm 1.24) \text{ W/m}^2$. The correction improves the revision system of SIAR.

Key words measurement; total solar irradiance; finite element method; opto-electric nonequivalence; world radiometric reference

OCIS codes 120.5630; 120.3930; 120.4800

收稿日期: 2015-11-04; 收到修改稿日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(41474161)、国家863计划(2015AA123703)

作者简介: 唐 潇(1990—),男,博士研究生,主要从事绝对辐射计光电不等效性及热平衡等方面的研究。

E-mail: tangxiao1022@126.com

导师简介: 方 伟(1965—),女,博士,研究员,主要从事太阳辐射计量及总设计等方面的研究。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

0408003-1

1 引言

绝对辐射计是利用光辐射热效应工作的热电型红外探测器,具有锥腔吸收率高、测量精度高的特点^[1]。其工作原理为利用光电等效性,用可精确测量的电功率复现入射的辐射光功率,电功率值即为辐射光功率的测量值。绝对辐射计为电替代辐射计,经过 50 多年的发展已成为目前测量太阳总辐照度的主要仪器^[2]。随着研究的不断深入以及空间光谱遥感的发展,人们对太阳总辐照度测量精度的要求越来越高。太阳辐照度测量过程中的各项误差修正,特别是光电不等效性修正已成为当前提高绝对辐射计精度和优化设计的关键问题。

由于光电加热区域或散热情况存在差异,即使在光电加热平衡状态下温度传感器输出值相同,光电功率也不一定等效。同时,由于不同国家研制的辐射计腔体结构和组成不同,光电不等效性的主要来源也不同。近期太空中工作的高精度太阳辐射计主要有 ACRIM-III(有源腔型辐射计监测仪-III)^[3]、PMOR(PMO 辐射计)^[4]和 TIM(太阳总辐照度监测仪)^[5-7]。其中,ACRIM-III^[3]为典型的正圆锥腔结构,加热丝盘绕在光辐射直接照射的区域。ACRIM-III 的光电不等效性主要来自腔组件结构的缺陷。加热丝盘绕在锥腔外壁,在电加热阶段,加热丝与周围环境热交换严重,使电加热功率损失很大。此外,在空气中工作时,辐射计与周围环境通过热对流所损失的热量将使测量结果存在很大的误差,甚至失去有效性。加热丝能量损耗难以量化,不能通过实验测量等方法对光电不等效性进行定量的评估,因此尚未对 ACRIM-III 的光电不等效性进行具体的研究。

PMOR 系列辐射计^[4]为倒置的圆锥腔结构,采用组合结构的黑体腔-锥底圆柱腔。这种组合腔能够增加光辐射在腔内的反射次数,提高辐射吸收率。其光电不等效性主要来自光电加热区域不同引起的差异。光加热阶段,辐射光功率入射组合结构的圆锥腔,部分能量通过镜面反射或漫反射继续传递,未被吸收的辐射残余能量使得辐射计光加热和电加热阶段的热平衡状态及温度分布情况存在差异。Brusa 等^[4]采用比较不同加热过程中空气-真空响应比的方法,对 PMOR 辐射计的空气-真空光电不等效性进行了对比,得到 PMOR 辐射计在空气中工作时光电不等效性的修正系数为 0.15%~0.45%,该修正使 PMOR 辐射计与世界辐射标准测量结果之间的相对偏差从 1.12×10^{-3} 降低到 5.8×10^{-4} 。

美国 SORCE 卫星上搭载的 TIM^[5-7]测量精度达到 0.035%,为目前测量精度最高的星载太阳辐照度绝对辐射计(SIAR)。其结构为圆锥腔型接收腔,采用加热丝直接埋入工艺,将电加热丝缠绕并填充在辐射光功率直接照射区域,从而使得光加热和电加热的加热面积和加热区域几乎一致。其光电不等效性的来源主要为传热路径的差异,即辐射光功率和电功率不同,加热路径对应的热阻存在差异。Kopp 等^[5]将辐射计接收腔的圆锥和圆柱分开考虑,将不同传热路径的传热过程简化为圆柱体系下的一维传热问题,求解光加热和电加热下传热路径的导热微分方程,根据解得的不同条件下热阻的比值对光电不等效性进行修正。该次修正测得 TIM 光电不等效性的差异占总合成不确定度的 26%。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在国家 863 计划的支持下开展了 SIAR 的研制工作^[8-12]。SIAR 搭载“风云三号”气象卫星在轨对太阳总辐照度进行长期监测。在 SIAR 的测量数据处理中,杨振岭等^[13]对辐射测量结果的真空-空气腔温响应变化进行了对比,得到空气中 SIAR 的相对修正系数为 0.15%。此外,方伟等^[14]也采用将加热丝埋在锥腔内的方法,以减小光电不等效对辐射测量结果的影响。然而,参考其他高精度辐射计的修正体系可知,SIAR 光电不等效定量修正的实验测量仍比较困难,是辐射计优化设计以及误差修正的难点所在。

为完善 SIAR 校正因子的评价体系,在提高星载光辐射测量精度以及在轨测量数据向世界辐射参考标准(WRR)溯源的需求牵引下,本文采用有限元单元法^[15-17],结合 SIAR 的实际测量过程,通过对比建立的有限元体系与实验测量结果,对 SIAR 的光电不等效性进行定量修正。

2 仪器

“风云三号”气象卫星^[18]搭载了 3 个 SIAR 系列辐射计,AR-1、AR-2、AR-3,在轨对太阳总辐照度进行测量。其中 AR-1 和 AR-2 对太阳辐照度进行常规的周期性监测,AR-3 主要用于修正运行过程中的性能退化。AR-1、AR-2、AR-3 的结构基本一致,其模型简图如图 1 所示。辐射计由热电堆、圆锥腔和热沉组成,热电堆起温度

传感器作用,用于实时测量锥腔与热沉之间的温度差异。圆锥腔分为接收腔和参考腔,接收腔进行正常的辐射测量,参考腔可对偶然因素引起的偏差进行修正,并消除热沉运行过程中温度漂移带来的误差。热沉为内部封装有热电堆、接收腔和参考腔的铝制圆柱型金属块,其与光加热和电加热产生的热量进行热交换从而使接收腔的温度趋于平衡。SIAR采取与PMOR系列辐射计相同的光学设计,经过精确面积测量的主光阑置于视场光阑之后,该设计有助于减少杂散光对辐射测量的影响,提高了SIAR的测量精度。

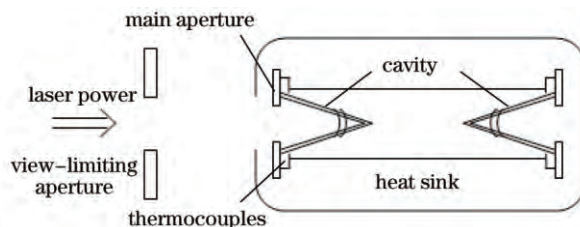


图1 AR-1简图

Fig.1 Schematic of AR-1

3 实 验

3.1 工作原理

SIAR在测量过程中采取快速测量、快速预测的方法^[19]达到国际比对的测量标准。采用该方法后的SIAR测量周期同世界标准一致,达到了90 s。但是,即使在光电完全等效的理想状态下,辐射计接收相同功率的光加热和电加热时,接收腔的温度响应仍不一致。故改进后SIAR的测量过程分为两个阶段:自测试阶段和辐射测量阶段。

1) 自测试阶段。关闭快门,通过加热丝对辐射计的接收腔交替施加高功率 P_H 和低功率 P_L ,并得到相对应的接收腔平衡温度 T_H 和 T_L 。则辐射计的响应度为

$$S = (P_H - P_L) / (T_H - T_L). \quad (1)$$

2) 辐射测量阶段。首先,打开快门进行光加热测量。为防止接收腔过快接收光功率辐射能量,引起接收腔内温度梯度分布发生明显的变化,在打开快门前对接收腔施加一个低电功率 P_1 ,通常情况下 $P_1 < 10 \text{ mW}$ 。接收腔吸收的辐射光功率 P_0 以及施加的低电功率 P_1 共同作用使得接收腔温度平衡在 T_1 。接着,关闭快门进行电加热定标。通过辐射计的响应度 S 预估接收腔温度达到 T_1 时所需的电功率 P_2 。因光加热和电加热的温度不一致性,施加电功率 P_2 时接收腔的实际平衡温度应为 T_2 。

综上,经过自测试修正后的辐射测量实际辐射光功率为

$$P_0 = P_2 - P_1 - S(T_2 - T_1). \quad (2)$$

结合已知的接收腔吸收率 α ^[20]、精确测量的主光阑面积 A ^[21]以及需要完善的SIAR光电不等效性因子 N ,辐射测量光功率的辐照度应为

$$E = \frac{NP_0}{\alpha A}. \quad (3)$$

3.2 腔温测试

测试了地面真空中不同激光功率入射时,接收腔在测试时间5 min内的瞬态温度响应,实验结果如图2所示。根据Fox等^[22]对绝对辐射计时间常数的定义,可知辐射计接收腔的瞬态温度变化满足

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

$$\tau = C/K, \quad (5)$$

式中 T_0 为接收腔的初始温度; C 为总热容; K 为总热导率; τ 为时间常数,是评定辐射计达到平衡状态的重要参数。当 $t = 10\tau$ 时, $T(10\tau) = 0.99995T_F$, T_F 为最终平衡温度。因此当 $t > 10\tau$ 时即可认为热平衡达到最大平衡温度,可进行电定标测量。根据(4)式对图2中不同激光功率下的腔温响应曲线进行单幂指数拟合,得到三次测试的时间常数分别为29.9、29.8、30 s。该结论说明时间常数为辐射计的固有属性,只与封装条件下圆锥

腔、热电堆和热沉的结构及组成相关,并不随施加功率的变化而改变。

入射激光功率为 83.3、73.8、53.3 mW 时,通过热电堆测得的接收腔与热沉的最终温度差异分别为 0.95、0.85、0.65 K。结合傅里叶定律,可知接收腔与热沉的最终温度差异与入射激光功率呈良好的线性关系,该线性关系是自测试阶段响应度计算的重要理论依据。

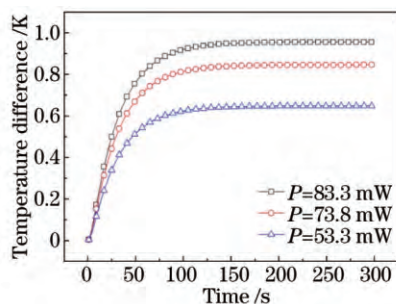


图2 不同入射激光功率下接收腔的温度响应

Fig.2 Dynamic thermal response of receiving cavity when input laser power is 83.3, 73.8, 53.3 mW, respectively

4 有限元模型

4.1 辐射计有限元模型

采用有限元单元法对 SIAR 的腔体组件进行有限元分析。实验测试时采用真空泵和分子泵相结合的抽真空方法,使得 SIAR 运行在 1×10^{-5} Pa 的高真空环境下,在有限元体系中可忽略接收腔外壁与辐射计内残余气体通过热对流所交换的能量。接收腔与热沉之间通过热传导传递的能量为

$$Q_c = \lambda A(T_r - T_{hs})/L, \quad (6)$$

接收腔与热沉之间热辐射传递的能量为

$$Q_r = \varepsilon \sigma A_r(T_r^4 - T_{hs}^4), \quad (7)$$

式中 T_r 和 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 的比值约为 950,故接收腔与热沉之间通过热辐射传递的能量在有限元体系中可不考虑。

简化后的 SIAR 腔体组件有限元单元模型如图 3 所示。该模型主要由接收腔、热电堆和热沉组成,还包含了起固定作用的压片(材料为铝)及起绝热作用的导热环(材料为聚酰亚胺)。接收腔的材料主要为银,因埋入了电加热丝,接收腔的热物理属性进行了细微的等效。热电堆的材料为聚酰亚胺,在外壁处缠绕了 180 对铜-康铜加热丝以产生热电效应。各材料的物理属性由文献[23-24]得到。

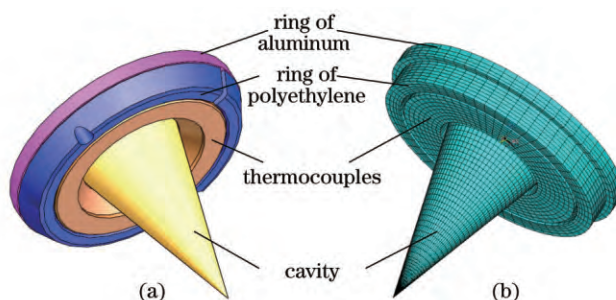


图3 SIAR腔体组件的(a)三维模型图和(b)有限元模型图

Fig.3 (a) 3D model and (b) finite element model of the essential elements of SIAR

4.2 辐射计模型与实验对比

辐射计的稳态灵敏度 R 是评价仪器性能的重要参数,决定了接收腔设置温度和测量功率的范围。在测量过程中, R 定义为接收腔与热沉温度差异与输入功率的比值:

$$R = \frac{T_r - T_{hs}}{P_0}. \quad (8)$$

为了确保有限元体系的准确性,对模型的稳态灵敏度进行了测试,并与实验测量数据进行对比,结果如图4所示。入射功率大于20 mW时,有限元体系计算的稳态灵敏度与实验测得的结果吻合较好,最大的灵敏度差异仅为 1×10^{-3} K/mW,相对误差为0.86%。说明建立的有限元体系与实际SIAR热交换过程一致,在光电不等效性定量实验测量困难较大的前提下,该有限元单元法能够对SIAR的光电不等效性进行修正。此外,实验测得的灵敏度大小随着入射功率的增加有缓慢减小的趋势,这是因为有限元体系建立在接收腔、热电堆和热沉完全热接触的前提下。而在实际过程中,腔体各组件之间通过环氧树脂胶粘接,树脂胶的不均匀分布和其中的气泡影响了热接触。当激光功率增加,温度升高时,辐射计传热系统的热阻会发生细微变化。

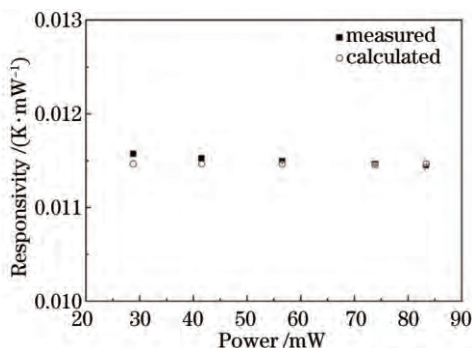


图4 有限元体系与实验结果的灵敏度比较

Fig.4 Comparison of responsivity between finite element system and experimental data

5 分析与讨论

5.1 辐射计光电不等效性来源

如上文所述,激光功率一次反射引起的偏差是TIM和PMOR系列辐射计光电不等效性的主要来源。SIAR在结构上采取与TIM辐射计相同的加热丝埋入银锥腔工艺,电功率直接施加在辐射光功率照射区域,不同加热面积引起的光电不等效性可以忽略。同时,在设计上借鉴了PMOR系列辐射计的光学设计,主光阑位于视场光阑之后以消除杂散光。故实验测试阶段,一次反射引起的光加热和电加热的加热功率分布差异是SIAR光电不等效性的重要来源,如图5所示。

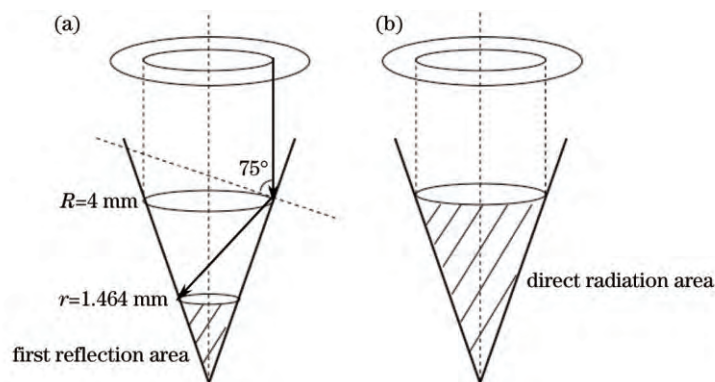


图5 (a) 光加热功率分布; (b) 电加热功率分布

Fig.5 Different power distribution of (a) laser heating and (b) electric heating

已知的黑漆为镜面反射黑,反射率为92%^[25]。由于第二次或更多次反射携带的能量将逐级递减,对辐射计加热功率分布的影响可忽略不计,故仅考虑激光功率第一次反射引起的偏差。由图5可知,电加热时,功率均匀分布在激光功率直接照射区域,即 $0 \leq r_0 \leq 4$ mm范围内,其中 r_0 为圆锥腔横截面半径。而光加热时,最边缘处光束经过镜面反射在 $r_0=1.464$ mm处,92%的激光功率能量均匀分布在 $0 \leq r_0 \leq 4$ mm区域,剩余8%的能量通过镜面反射后最终分布在 $0 \leq r_0 \leq 1.464$ mm区域,不同的加热功率分布导致了SIAR的光电不等效。

5.2 辐射计光电不等效性修正

根据SIAR光电不等效性的来源,将不同大小的激光功率和电功率按照从低到高的顺序依次施加在接收

腔的照射区域。光加热阶段,根据有限元单元法,入射功率在有限元体系中产生了不均匀的功率分布。对比光加热和电加热接收腔的不同腔温响应,得到SIAR光电不等效性的相对修正系数为 $5.67\times 10^{-5}\sim 6.73\times 10^{-5}$,如表1所示。其中入射功率小于10 mW的测试结果并没有纳入本次修正,原因是黑漆材料的热导率和比热容较低,当入射功率较小时,其内部的温度梯度分布受杂散光和主光阑热辐射影响较大,会引入较大误差。

表1 辐射计光电不等效性修正系数

Table 1 Relative correction factors of radiometer

Input power /mW	Temperature difference /K		Relative correction factor
	Laser heating	Electric heating	
10.370	0.118899	0.118907	6.73×10^{-5}
18.454	0.211588	0.211600	5.67×10^{-5}
28.843	0.330705	0.330725	6.05×10^{-5}
41.533	0.476206	0.476233	5.67×10^{-5}
56.539	0.648260	0.648298	5.86×10^{-5}
73.843	0.846167	0.846218	6.03×10^{-5}
83.362	0.955810	0.955860	5.23×10^{-5}

由表1可见相同功率下,光加热的接收腔最终温度差异略小于电加热的情况。结合傅里叶基本传热定律,可知在实际实验测量过程中,光加热和电加热平衡状态温度传感器输出温度差异相同时,辐射光功率略大于等效的电功率。对相对修正系数取平均值,可得SIAR光电不等效修正因子 $N=1.000059$,不确定度为0.000003。由文献[26]可知,SIAR测得的经过背景冷空间辐射、日地平均距离和热沉温度偏移等修正后的太阳总辐照度值为 1365.62 W/m^2 ,总不确定度为 1.24 W/m^2 。对该数据进行光电不等效性修正,可得SIAR的太阳总辐照度最终测量值为 $(1365.70\pm 1.24)\text{ W/m}^2$ 。该修正完善了SIAR校正因子的修正体系,提高了星载光辐射的测量精度,进一步将SIAR的在轨测量数据向世界辐射参考标准进行溯源。

6 结 论

绝对辐射计的优化设计和性能提高需要对仪器的光电不等效性进行系统的修正。以光辐射实际测量过程为基础,运用有限元单元法对光加热时一次反射引起的偏差进行了定量修正。修正结果表明,实际测量过程中,太阳总辐照度的实际值应略大于现有的SIAR测量值,为 1365.70 W/m^2 ,不确定度为 1.24 W/m^2 。该修正改善了SIAR的可传递性,有助于SIAR在轨测量数据与世界辐射参考标准进行进一步对比。此外,不同激光功率入射情况下,辐射计接收腔的瞬态温度响应表明,时间常数为接收腔的固有属性,不受背景冷空间辐射等其他因素的影响,SIAR的时间常数稳定在30 s左右。该数据与TIM等国外辐射计相比仍存在一定差距,需进一步减小。可对影响时间常数的各项因子进行深入研究,以实现测量数据准确性和可用性的平衡。

参 考 文 献

- 1 Fang Wei. Dual cavity inter-compensate absolute radiometer (DCICAR)[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- 方 伟. 双锥腔互补型绝对辐射计(DCICAR)[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- 2 Fröhlich C. History of solar radiometry and the world radiometric reference[J]. Metrologia, 1991, 28(3): 111–115.
- 3 Willson R C. The ACRIMSAT/A CRIM3 experiment – extending the precision, long-term total solar irradiance climate database[J]. The Earth Observer, 2001, 13(2): 14–17.
- 4 Brusa R W, Fröhlich C. Absolute radiometers (PM0–6) and their experimental characterization[J]. Applied Optics, 1986, 25(22): 4173–4180.
- 5 Kopp G, Lawrence G. The total irradiance monitor (TIM): Instrument design[J]. Solar Physics, 2005, 230(1): 91–109.
- 6 Kopp G, Heuerman K, Lawrence G. The total irradiance monitor (TIM): Instrument calibration[J]. Solar Physics, 2005, 230(1): 111–127.
- 7 Kopp G, Lawrence G, Rottman G. The total irradiance monitor (TIM): Science results[J]. Solar Physics, 2005, 230(1): 129–139.
- 8 Yu Bingxi, Fang Wei, Wang Yupeng. The radiation exchange between the space and the absolute radiometer along with the solar observation on spacecraft[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1048–1052.

- 禹秉熙, 方 伟, 王玉鹏. 卫星上绝对辐射计观测太阳时与太空的辐射交换[J]. 光学学报, 2005, 25(8): 1048–1052.
- 9 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 谨, 方 伟, 等. 太阳辐射检测仪观测角度变化的修正[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0212003.
- 10 Wang Hongrui, Fang Wei. Solar irradiance absolute radiometer with ability of automatic solar tracking[J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(3): 252–258.
- 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.
- 11 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.
- 12 Yang Dongjun, Fang Wei, Ye Xin, *et al.*. High precision sun-tracking of spaceborne solar irradiance monitor[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2483–2490.
- 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.
- 13 Yang Zhenling, Fang Wei, Song Baoqi, *et al.*. Variation of solar irradiance absolute radiometer cavity temperature response in vacuum and its effect[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912008.
- 杨振玲, 方 伟, 宋宝奇, 等. 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[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912008.
- 14 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]. Solar Physics, 2014, 289(12): 4711–4726.
- 15 Lü Shasha, Wang Chun, Shen Hui, *et al.*. Finite element analysis of acceleration sensitivity of optical cavities supported by soft materials [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102001.
- 吕莎莎, 王 春, 沈 辉, 等. 采用软性材料支撑时光学谐振腔加速度敏感度的有限元分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102001.
- 16 Chi Shanshan, Wang Xuyue, Xu Wenji. Numerical simulation on stainless steel-carbon steel laminated sheet considering interface during pulsed laser bending[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103002.
- 池闪闪, 王续跃, 徐文骥. 考虑结合面的不锈钢-碳钢层合板脉冲激光弯曲数值模拟[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103002.
- 17 Fang Jinxiang, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.*. Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0503009.
- 方金祥, 董世运, 徐滨士, 等. 考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503009.
- 18 Yang Z D, Lu N M, Shi J M, *et al.*. Overview of FY-3 payload and ground application system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12): 4846–4853.
- 19 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.
- 20 Fang Wei, Wang Yupeng. Influence of UV radiation on absorptivity of cavity of absolute radiometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 775–780.
- 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.
- 21 Chen Xiangzi, Fang Wei, Yang Zhenling, *et al.*. Main aperture area measurement of the SIAR[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0912003.
- 陈祥子, 方 伟, 杨振玲, 等. 太阳辐照绝对辐射计主光阑面积测量[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0912003.
- 22 Fox N P, Rice J P. Absolute radiometers[M]. //Experimental methods in the physical sciences. St. Louis: Academic Press, 2005: 35–96.
- 23 Touloukian Y S. Thermophysical properties of matter (vol. 1)[M]. New York: IFI/Plenum Press, 1970: 82–105.
- 24 Touloukian Y S. Thermophysical properties of matter (vol. 4)[M]. New York: IFI/Plenum Press, 1970: 101–129.
- 25 Cui G F, Li N, Li D Y, *et al.*. The physical and electrochemical properties of electroless deposited nickel-phosphorus black coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200: 6808–6814.
- 26 Wang H R, Li H D, Qi J, *et al.*. Total solar irradiance monitor for the FY-3B satellite – space experiments and primary data corrections [J]. Solar Physics, 2015, 290(2): 645–655.

栏目编辑: 张 雁