

doi: 10.3788/gzxb20164511.1128001

比值辐射计空间环境适应性设计及验证

李孟凡^{1,2,3}, 邹鹏^{1,3}, 孙真^{1,3}, 金洁^{1,3}, 曹兴家^{1,3}, 黄文薪^{1,3}, 洪津^{1,3},
司孝龙^{1,3}, 乔延利^{1,3}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

(3 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

摘 要:结合卫星发射以及在轨运行过程中所处的环境条件,对“积分球+匀光板+电磁光开关”形式的比值辐射计进行空间环境适应性设计.对结构薄弱环节进行强化加固设计,通过降低器件功耗、表面热处理等方式保持比值辐射计在真空热环境下的温度稳定,采用航天级光学涂层辅以结构屏蔽设计保证抗辐照能力.通过力学试验、热真空试验以及积分球光学涂层辐照试验进行验证.力学试验结果显示比值辐射计基频约为 540 Hz,振动前后比值辐射计辐射比变化小于 0.31%,证明比值辐射计具有良好的结构稳定性,空间力学条件下的结构强度和刚度均满足基频大于 100 Hz 的设计要求.热真空试验过程中比值辐射计遥测输出稳定,各功能模块均工作正常.辐照试验后,比值辐射计光学涂层方向-半球反射比在 485 nm 波段的最大衰变小于 2%,红外波段无明显变化,该衰变对定标器在轨应用性能的影响可以忽略.研究表明,比值辐射计具有良好的空间环境适应性,可在复杂空间环境下进行稳定、可靠的工作,满足航天应用需求.

关键词:光学遥感; 天上定标; 环境试验; 比值辐射计; 力学; 热真空; 空间辐照

中图分类号: V416.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1128001-7

Design and Verification of Space Adaptability for Ratioing Radiometer

LI Meng-fan^{1,2,3}, ZOU Peng^{1,3}, SUN Zhen^{1,3}, JIN Jie^{1,3}, CAO Xing-jia^{1,3},
HUANG Wen-xin^{1,3}, HONG Jin^{1,3}, SI Xiao-long^{1,3}, QIAO Yan-li^{1,3}

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: According to the environment during launch and on orbit, special design was carried out to improve spatial environment adaptability for ratioing radiometer which consists of integrating sphere, diffuser shutter and electronic optic cut. Weak part of ratioing radiometer was strengthened after making mechanical simulation. The temperature stability under thermal vacuum environment was realized by limiting the power of components and surface heat treatment. The radiation-proof ability was guaranteed by employing space-grade optical coating and making structure shield. Spatial environment adaptability was verified by mechanical, thermal vacuum and space radiation experiments. Mechanical testing results show that the fundamental frequency of the ratioing radiometer is about 540 Hz. The variation of the ratio for sun view to diffuser view of ratioing radiometer after mechanical experiments is within 0.31%.

基金项目:中国科学院科技创新重点项目(No. KGFZD-125-13-006)和国家自然科学基金委员会—中国科学院天文联合基金(No. U1331111)资助

第一作者:李孟凡(1989—),女,博士研究生,主要研究方向为定量化遥感分析与应用. Email: limengfan1989@163.com

通讯作者:邹鹏(1983—),男,副研究员,博士,主要研究方向为光电探测与信号处理. Email: pzou@aiofm.ac.cn

导师:洪津(1969—),男,研究员,主要研究方向为光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术. Email: hongjin@aiofm.ac.cn

收稿日期:2016-05-16; **录用日期:**2016-09-01

<http://www.photon.ac.cn>

The structural strength and rigidity of the ratioing radiometer could meet the design requirement that the fundamental frequency should be above 100 Hz. The electronic components of the ratioing radiometer maintain normal during thermal vacuum experiments. The degradation of directional/hemisphere reflectance for the ratioing radiometer at 485 nm after space radiation tests is within 2%, while the change of directional/hemisphere reflectance in longer wavelength is negligible. The above results show that the ratioing radiometer has good space adaptability and is able to work steadily and reliably in complex space environment, which meets the needs for aerospace application requirements.

Key words: Optical remote sensing; On board calibration; Environment simulation tests; Ratioing radiometer; Mechanical; Thermal vacuum; Space radiation

OCIS Codes: 280.4788; 010.5620; 010.5630; 150.1488

0 引言

空间遥感对地物目标信息的高准确度获取依赖于遥感信息定量化水平的提高,而辐射定标是定量化遥感的基础和前提。受卫星发射过程以及在轨环境影响,地面辐射定标确立的定量关系会发生变化,通过星上绝对辐射定标可以对空间遥感的定标系数进行在轨校正^[1-2]。

“太阳+漫射板”形式的星上定标器是一种新型星上定标装置,采用反射特性已知的漫射板(Solar Diffuser, SD)将太阳光引入遥感器光路前端形成辐亮度标准,对遥感器进行全光路、全孔径、全视场的星上绝对辐射定标。但漫射板的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)受空间辐照影响会发生衰变,影响星上定标准确度。比值辐射计(Ratioing Radiometer, RR)通过对漫射板与太阳的比对测量,能够监视和修正漫射板的在轨衰变,是实现遥感器高准确度在轨定标的关键部件^[3]。从20世纪末发展至今,比值辐射计已被成功应用于美国中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、可见光红外成像辐射计(Visible Infrared Imaging Radiometer, VIIRS)等多个遥感器的星上定标。其结构由太阳观测口、针孔阵列屏、漫射板观测锥口、电机、棱镜、积分球以及多通道探测器构成,观测光路的切换采用电机带动棱镜旋转,将太阳、漫射板光线依次引入积分球唯一入光口的方式,取得较好的应用效果。但应用过程中存在针孔阵列屏与积分球入口的几何关系要求较高、探测器观测到积分球的二次反射光、太阳入射角度变化对各探测器响应一致性影响较大等不足^[4-7]。我国近年来也逐步开展了关于比值辐射星上定标方法的研究工作,将漫射板与比值辐射计均放置于定标舱内,利用定标舱门开关时序的精确控制实现观测光路的切换^[8-9],该方案目前处于发射前性能测试阶段,其效果需待在轨应用后进行全面评估。为适应某光学载荷星上定标需求,结合其质量、结构尺寸等约束条件,安徽光机所提出了一种“积分球+匀光板+电磁光开关”形式的比值辐射计,并对其在应用及性能评估方面进行了深入研究^[7]。

作为航天应用产品,在满足定标性能需求的同时,还应在寿命期内具有良好的空间环境适应性^[10]。比值辐射计随遥感器运行于低太阳同步轨道,在轨工作寿命为8年,发射与在轨工作期间会受到力学、热、真空和空间辐照环境等因素的影响。地面运输及卫星运载过程中,系统共振、发动机推力周期变化以及排气噪声等因素影响,可诱发比值辐射计共振,使得局部应力过大,造成结构的破坏或光学元件的移位,对比值辐射计光机组件产生不可忽视的影响^[10-12]。比值辐射计在轨飞行期间处于冷热交变的温度场之中,电子元器件以及运动部件遭受持续的温度循环应力,且在真空环境下辐射散热速率较慢,会产生过多热量积累,导致电子元器件或运动部件温度升高、性能下降,最终影响定标数据的有效性^[10]。比值辐射计的光学涂层受到太空辐照的影响,造成材料剥蚀老化和性能下降,空间辐射源会通过位移效应、电离效应和表面效应等多种损伤机制使得光电探测器性能发生衰变,严重情况下会导致探测器的损坏或永久失效^[13-14]。上述复杂因素均会对比值辐射计应用性能以及在轨运行可靠性产生不可预知的影响,为此需要进行针对性的适应性设计及验证,以应对比值辐射计所处的复杂空间应用环境。

本文介绍了“积分球+匀光板+电磁光开关”形式的比值辐射计设计方案,对其开展了空间环境适应性设计及验证,并对验证结果进行了分析讨论。

1 比值辐射计原理及空间环境适应性设计

1.1 比值辐射计原理

“积分球+匀光板+电磁光开关”形式的比值辐射计原理图如图1,主要由太阳观测筒、漫射板观测筒、两只“电磁铁+挡板”形式的电磁光开关(Electronic Optic Cut, EOC)、积分球、匀光板、多通道探测器和电路盒构成。通过合理设计两观测筒参量能够完成两观测筒入射能量的匹配;两只电磁光开关挡板位于两观测筒孔径光阑处,通过通、断电控制能够实现比值辐射计对太阳、漫射板以及暗背景的交替观测。相比于MODIS比值辐射计采用棱镜切换光路的方式,该比值辐射计光路中不包括运动部件,光路更加稳定,同时,

电磁光开关挡板在非定标状态下处于“关闭”状态,避免阳光直射太阳观测孔径光阑及积分球内部光学涂层,在保护积分球涂层免受污染的同时能够有效降低太阳辐照对积分球内光学涂层的影响;匀光板位于积分球内部,太阳、漫射板入射光线照明区域均位于匀光板中心位置附近,经过至少4次漫反射之后到达多通道探测器,能够有效改善太阳入射角度变化对探测器响应一致性的影响。

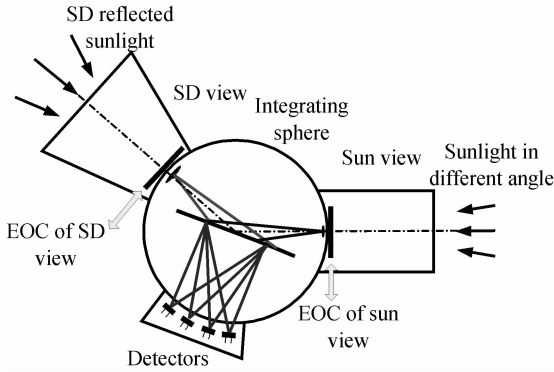


图1 比值辐射计原理

Fig. 1 Principle of ratioing radiometer

根据 MODIS 对漫射板双向反射比因子 (Bidirectional Reflectance Factor, BRF) 的在轨测试研究,漫射板衰变过程中,其反射特性在各个方向上的相对关系始终保持不变^[15],因此,遥感器观测方向漫射板 BRDF 的衰变可由比值辐射计监测得到的衰变量表示。比值辐射计通过获取不同时刻太阳、漫射板的观测响应之比(简称辐射比),建立漫射板辐亮度与稳定太阳照度的相对变化关系,从而实现漫射板 BRDF 衰变的修正,漫射板修正系数表示为

$$\Delta_{SD} = \frac{V_{SD,t}(\theta_{SD,t}, \varphi_{SD,t}) / V_{sun,t}(\alpha_t)}{V_{SD,t_0}(\theta_{SD,t_0}, \varphi_{SD,t_0}) / V_{sun,t_0}(\alpha_{t_0})} \cdot \frac{\cos \theta_{SD,t} \rho_{lab}(\theta_{SD,t}, \varphi_{SD,t}; \theta_{RR,t}, \varphi_{RR,t})}{\cos \theta_{SD,t_0} \rho_{lab}(\theta_{SD,t_0}, \varphi_{SD,t_0}; \theta_{RR,t_0}, \varphi_{RR,t_0})} \cdot \frac{K(\alpha_t)}{K(\alpha_{t_0})} \quad (1)$$

式中第一项为 t 时刻辐射比与初次定标时刻 t_0 辐射比的比值,第二项为太阳照明漫射板角度的修正系数,第三项为太阳照明比值辐射计太阳观测筒角度的修正系数,参量详细说明见文献^[8]。比值辐射计采用同一电子学和光学系统进行太阳、漫射板比对观测,相关参量均可通过比值消除,有效降低探测器衰变以及积分球光学涂层长期衰变带来的影响,从而实现长期、高准确度的星上定标。

1.2 比值辐射计空间环境适应性设计

比值辐射计的空间环境适应性设计是指通过优化设计使得:在力学环境下比值辐射计的结构尺寸、相对位置保持稳定,从而确保比值辐射计光学参量(如辐射比、几何因子等)的稳定性;在真空热环境下比值辐射计各项功能、动作均能可靠执行,电子学性能参量变化均处于可接受范围内;在空间辐照环境下,比值辐射计

辐照敏感器件性能衰减对比辐射应用性能的影响甚微。

根据卫星建造规范对载荷结构的设计要求,为避免在运输及发射过程中出现共振,遥感器基频需为卫星平台基频的三倍以上,小质量设备的基频应大于 100 Hz,并且随机振动加速度放大倍数应小于 $10^{[9-10]}$ 。针对积分球光学涂层聚四氟乙烯材料刚性低、抗振动能力弱的特点,设计了金属壳体并将聚四氟乙烯球体放置于其中,令聚四氟乙烯球体外表面与金属壳体紧密结合,使得球体在振动环境下所受到的扭力、剪切力由高强度的金属壳体承担。金属壳体采用铝合金整料加工而成,能够为比值辐射计观测筒、探测器等结构提供稳固的安装基础,从而提高比值辐射计整体刚度。通过有限元分析软件 ANSYS Workbench 14.0,对比值辐射计进行模态分析,以考察其固有频率并预测振型,对结构基频是否达到性能指标做出初步判断。仿真分析结果表明,比值辐射计整体基频大于 170 Hz,满足卫星对比值辐射计提出的基频要求。电磁光开关作为比值辐射计唯一的活动部件,其挡板具有一定旋转和摆动的自由度,为了避免在振动过程中挡板与周围结构出现碰撞引起卡死,造成比值辐射计观测切换功能的失效,设计挡板活动包络与周围结构预留至少 0.5 mm 的余量。根据寿命期内星上定标活动次数,电磁光开关动作次数约为 1 万次。通过结构改进与验证,电磁光开关寿命能够达到 15 万次以上。

针对比值辐射计在轨道运行过程中所经历的真空热环境,一方面降低比值辐射计电子元器件自身功耗并进行功率降额设计以减少产热,对于电源转换器等功率大于 0.2 W 的电子元器件,将其直接安装于结构机壳并涂抹导热硅脂,降低其与机壳间的热阻,减小器件温升;另一方面通过表面处理,增加结构表面发射率以提高整体散热能力,其中电磁光开关为不锈钢和软磁合金材料,对其表面进行镀黑镍处理,对其他铝合金结构表面进行黑色阳极化处理。

根据比值辐射计所处的空间辐照环境,要求探测器抗辐照能力不小于 20 krad(Si),依据半导体光电器件筛选规范完成了探测器筛选试验,对低可靠度器件进行了剔除,通过辐照试验验证了其空间环境适应能力,结果表明比值辐射计所选用的探测器抗辐照能力可达 35 krad(Si)^[16]。为保证测量信噪比,积分球光学涂层受空间辐照影响发生衰变导致的光电探测器接收能量衰减应小于 50%。聚四氟乙烯材料自身对光辐射不敏感,具备良好的抗辐照能力,但在空间辐照环境下,污染物可能使涂层状态发生改变,导致聚四氟乙烯涂层的反射率衰变,为此采用航天级光学涂层以减少污染物引起的在轨反射率衰变^[3]。根据积分球工作原理,光电探测器接收到的辐照度为

$$E_s = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \frac{\rho}{\rho(1-f)} \quad (2)$$

式中, Φ 为积分球入射通量, r 为光学涂层空腔半径, f 为积分球开口比, ρ 为光学涂层反射率. 此处假设光学涂层反射率整体发生衰变. 可以看出, 光学涂层反射率的变化对积分球输出能量影响较大, 通过计算, 为保证能量衰减小于 50%, 积分球光学涂层整体在轨反射率衰变应小于 4%.

2 检测方法

2.1 辐射比检测方法

力学环境可能导致比值辐射计观测筒光阑结构的变形以及光阑之间的距离变化, 引起比值辐射计光学参量发生变化. 因此, 通过对比试验前后辐射比的测试值, 可以反映出比值辐射计的力学性能. 测试基于灯-板系统实现, 测试原理如图 2. 令比值辐射计太阳观测筒正对光源, 距离为 d , 采集观测信号为 V_{sun} , 调整漫射板与光源同样保持距离为 d , 比值辐射计漫射板观测口以 45° 角观测漫射板中心处, 采集观测信号 V_{SD} , 则辐射比 R 为

$$R = V_{SD} / V_{sun} \quad (3)$$

辐射比测试重复性优于 0.5%, 若试验前后所测辐射比的偏差小于该值, 则判定比值辐射计光学参量未发生变化.

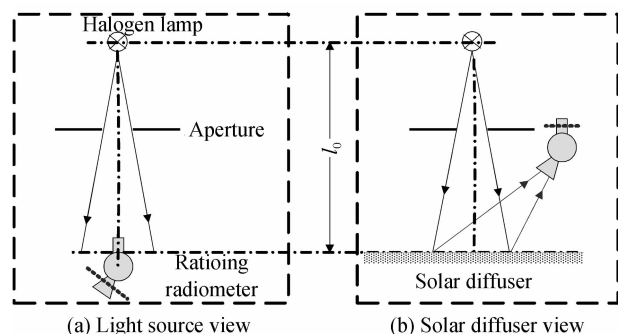


图 2 辐射比测试原理

Fig. 2 Principle of radiation ratio measurement

2.2 工作状态及功能检测方法

设置比值辐射计工作电流和遥测电压用于监测比值辐射计工作状态及功能, 可在热真空环境中模拟试验过程中的电子学状态监测. 工作电流可以反映电路模块中器件损坏、短路以及断路等引起的异常现象, 正常情况下比值辐射计工作电流范围为 0.13~0.5 A; 遥测电压通过比值辐射计内部电源模块输出分压获得, 可以反映比值辐射计电源模块的工作状态, 遥测电压设计输出值为 4 ± 0.3 V.

此外, 通过检查比值辐射计工作过程中电磁光电开关动作执行情况, 可以辅助完成比值辐射计工作状态的判断.

2.3 光学涂层检测方法

空间辐照可能使聚四氟乙烯材料发生老化, 导致其光学参量的衰变, 故通过对比试验前后的方向-半球反射比 (Directional Hemisphere Reflectance, DHR) 反映空间辐照性能的变化. DHR 的测量由分光光度计传递标准参考板的方向半球反射比实现^[17], 计算公式为

$$\rho_{\text{sample}}(0/d) = \rho_{\text{standard}}(0/d) \times \frac{V_{\text{sample}}}{V_{\text{standard}}} \quad (4)$$

式中: $\rho_{\text{standard}}(0/d)$ 为标准参照板的方向半球反射比, 其值溯源于中国计量科学研究院; $\rho_{\text{sample}}(0/d)$ 为待测样品方向半球反射比; V_{sample} 为比值辐射计漫射涂层样品测量电压; V_{standard} 为标准参照板测量电压.

3 试验验证过程与结果

3.1 力学试验

以整星坐标系为基准进行力学试验, 通过专用 L 型夹具, 将比值辐射计固定于振动试验台, 通过更换夹具在振动台上的安装方式完成三个方向的力学试验. 试验夹具以及振动方向如图 3, 模拟发射期间由卫星和传感器传递至比值辐射计的振动情况, 随机振动试验条件见表 1, g_{rms} 为均方根加速度. 其中, X 向、Y 向与比值辐射计底座相邻两侧边方向一致, Z 向指向比值辐射计顶部. 根据力学仿真结果以及光学性能敏感部位分析结果, 分别将测点 1~4 布置于控制电路盒上盖、积分球金属外壳、观测筒以及电磁光开关.

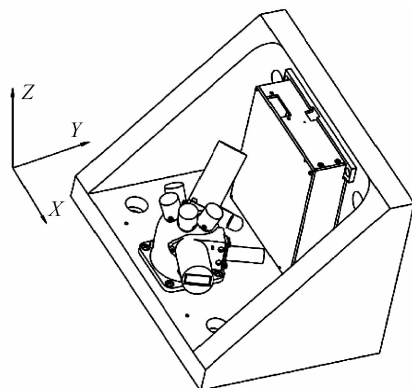


图 3 比值辐射计力学试验夹具及方向示意

Fig. 3 Diagram of RR mechanical test jig and directions

表 1 随机振动试验条件

Table 1 Experiment conditions of random vibration

Parameter	Value		
Frequency/Hz	20~80	80~350	350~2 000
Power spectral density	+3 dB/oct	0.04 g ² /Hz	-3 dB/oct
Total RMS acceleration	6 · g _{rms}		
Direction	X、Y、Z axis direction		
Time	4 min/direction		

随机振动过程中,各方向响应谱线如图4,比值辐射计基频约为540 Hz,满足基频大于100 Hz的设计要求,最大响应出现在Y向控制电路盒上盖,与力学仿真

振型相符合.Z方向加速度响应最大,其均方根(Root Mean Square,RMS)为12.086 g,输入激励RMS值为4.398 g,放大倍数2.75小于10,满足设计要求.

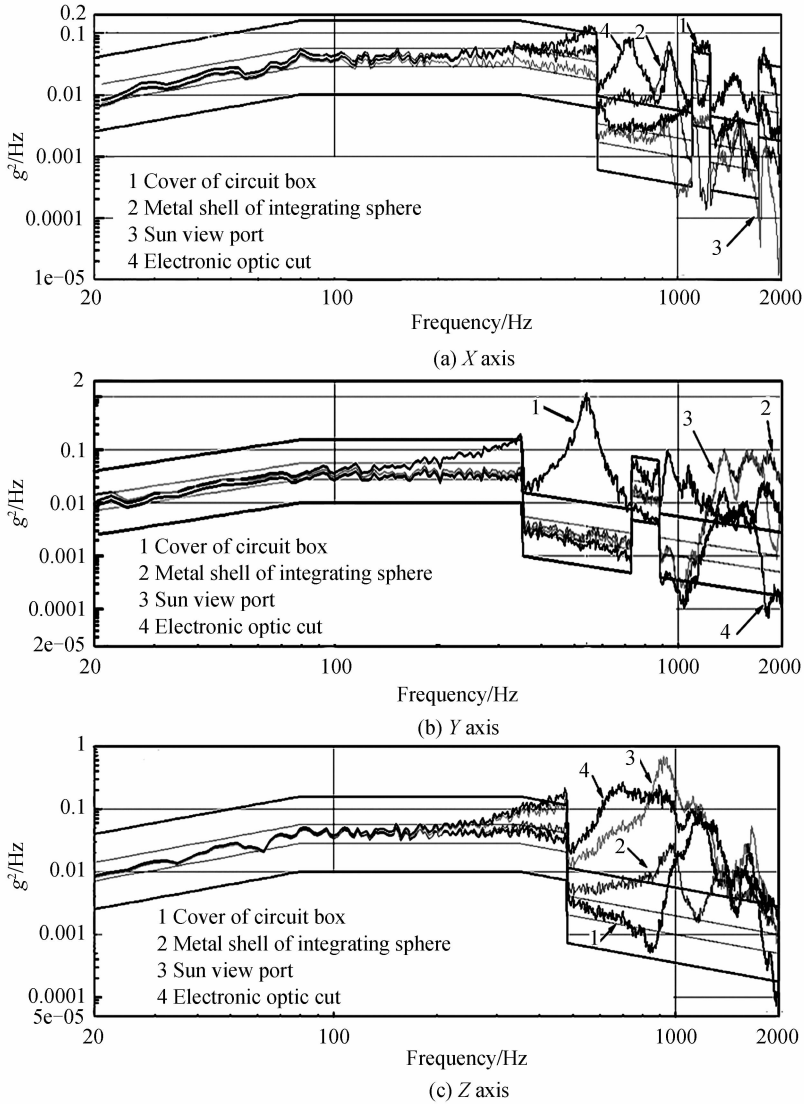


图4 比值辐射计随机振动试验结果

Fig. 4 Results of RR random vibration experiment

力学试验前后辐射比测试结果见表2,两次测试辐射比偏差小于0.31%,说明比值辐射计光学、结构参量在力学试验前后未发生改变,比值辐射计在空间力学环境下具备良好的结构稳定性.

表2 试验后辐射比变化量

Table 2 Change of radiation ratio after experiments

Center wavelength/nm	Change of R/%
485	0.16
660	0.24
900	0.31
1 625	0.23

3.2 热真空试验

比值辐射计热真空试验在热真空罐内完成,试验装置如图5.比值辐射计安装于温控基板,表面包覆多

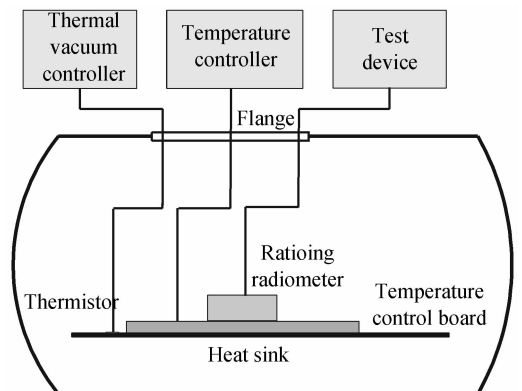


图5 比值辐射计热真空试验装置

Fig. 5 Equipment of thermal vacuum test of ratioing radiometer

层处理,在电路盒及探测器周围贴装测温点用于监测其温度变化.比值辐射计在轨所处环境温度为 $-5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,调节真空罐热沉以及温控基板温度,使比值辐射计按“高温保持-降温-低温保持-升温”的方式进行循

环,具体试验条件见表3.在高(低)温保持阶段对比值辐射计通电,并以一定间隔发送工作指令,通过监测遥测参量判定比值辐射计工作状态.

表3 热真空试验条件

Table 3 Conditions of thermal vacuum test

Parameter	Vacuum degree/Pa	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Number of cycles	Temperature range rate/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	Residence time of extreme temperature/h
Value	$\leq 6.65\times 10^{-3}$	$-15\sim 55$	4	> 0.5	≥ 6

热真空试验过程中的比值辐射计遥测参量监测结果见表4,工作电流与遥测电压均处于正常工作范围内,数据采集及电磁光开关动作功能均正常.各测温点温度监测结果显示比值辐射计电路盒以及电磁光开关均未出现明显的温升现象.

表4 比值辐射计电子学监测结果

Table 4 Result of RR electronic monitoring

Parameter	Working current/A	Telemetry voltage/V
Value	0.136~0.478	3.96~3.973

3.3 空间辐照试验

比值辐射计随载荷运行于低太阳同步轨道,极限条件下寿命期内的原子氧累计通量为 $4\times 10^{19}\text{ AO}/\text{cm}^2$,总剂量达20000 krad(Si),累计紫外辐照时间约为10 h.根据比值辐射计所处的空间环境,以微波源原子氧、Co-60 γ 射线源、高压汞氙灯分别作为原子氧、总剂量和真空紫外辐照试验的辐照源,对比值辐射计光学涂层同批次样品1号、6号、10号和16号进行空间辐照试验,试验条件见表5.

表5 空间辐照试验条件

Table 5 Experiment conditions of space irradiation

Items	Conditions	Sample number
Atomic oxygen	Vacuum degree: $\leq 6.65\times 10^{-3}\text{ Pa}$ Accumulated flux: $4\times 10^{19}\text{ AO}/\text{cm}^2$	1, 6
Total dose irradiation	Total dose: 20000 krad(Si)	16, 6
Vacuum ultraviolet irradiation	Vacuum degree: $\leq 6.65\times 10^{-3}\text{ Pa}$ UV irradiance: $11.8\sim 59.0\text{ mW}/\text{cm}^2$ Radiation time: 48 h	10, 6

比值辐射计漫反射涂层样品的半球方向反射比(DHR)在空间辐照试验后的变化情况如图6.由样品1、样品16的测试结果可以看出,原子氧辐照试验与总剂量辐照试验对比值辐射计漫反射涂层样品DHR影响在0.2%以内,真空紫外辐照试验后,样品10的DHR在485 nm波段的相对变化小于0.5%,在波长大于500 nm时的相对变化小于0.4%.对样品6进行了综合辐照试验,其DHR在485 nm波段的相对变化在2%以内,波长大于600 nm时,样品6的DHR变化小于0.4%.对比试验结果可知,空间环境对比值辐射计光学涂层的影响与漫射板在轨衰变模式相近,即波长越短,衰变程度越大.与原子氧、总剂量辐照环境相比,真空紫外辐照对比值辐射计光学涂层影响略明显,而在三种辐照环境共同作用下,比值辐射计光学涂层衰变程度最大.空间辐照试验结果表明,比值辐射计光学涂层在监视波段的空间辐照环境下的衰变小于2%,满足小于4%的应用需求.

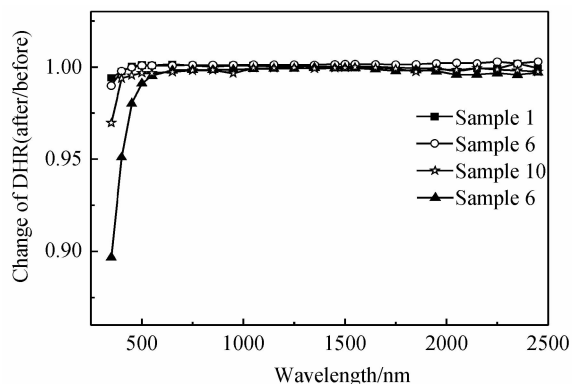


图6 空间辐照试验后比值辐射计漫反射涂层样品DHR相对变化

Fig. 6 Relative change of DHR for RR diffuse reflection coating sample after space irradiation experiments

4 结论

本文结合卫星发射过程以及在轨工作所经历的环境,完成了“积分球+匀光板+电磁光开关”形式的比

值辐射计空间环境适应性设计及试验验证. 力学试验结果表明,比值辐射计基频约为 540 Hz,随机振动加速度放大倍数小于 3,振动前后辐射比相对变化小于 0.31%,说明比值辐射计结构稳定性及刚度满足设计要求. 热真空试验过程中的比值辐射计输出遥测参量稳定,且各项功能均正常,试验过程中电路盒及电磁光开关均未出现明显的温升现象,验证了试验条件下比值辐射计真空热环境下的工作能力. 辐照试验后,比值辐射计光学涂层样品的 DHR 在监视波段的衰变小于 2%,表明比值辐射计光学涂层在空间辐照环境中具备良好的光学性能保持能力.

参考文献

- [1] XIA Zhi-wei, WANG Kai, FANG Wei, *et al.* Application and development of radiation calibration in orbit based on space monochromator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 1880-1891.
夏志伟,王凯,方伟,等. 基于航天单色仪的在轨辐射定标应用与发展[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(7): 1880-1891.
- [2] ZHENG Xiao-bing. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(1): 2-8.
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. 大气与环境光学报, 2014, **9**(1): 2-8.
- [3] YANG Ben-yong, ZHANG Li-ming, SHEN Zheng-guo, *et al.* Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1851-1858.
杨本永,张黎明,沈政国,等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(8): 1851-1858.
- [4] XIONG X, ANGAL A, SUN J, *et al.* On-orbit performance of MODIS solar diffuser stability monitor [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, **8**(1): 083514.
- [5] XIONG X, FULBRIGHT J, ANGAL A, *et al.* Assessment of MODIS and VIIRS solar diffuser on-orbit degradation [C]. SPIE, 2015, **9607**: 96071T.
- [6] MURGAI V, NELSON N, MCCARTHY J. JPSS-1 VIIRS solar diffuser stability monitor response versus sun angle of incidence[C]. SPIE, 2015, **9607**: 960715.
- [7] HUANG Wen-xin, ZHANG Li-ming, SI Xiao-long, *et al.* Theory of on-board reflectance calibration and the study of its precision maintenance method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(6): 0623001.
黄文薪,张黎明,司孝龙,等. 星上反射率定标原理及其准确度保持方法研究[J]. 光学学报, 2016, **36**(6): 0623001.
- [8] LI Meng-fan, XU Wei-wei, ZOU Peng, *et al.* Response characteristic of the ratioing radiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(2): 0212005.
李孟凡,徐伟伟,邹鹏,等. 比值辐射计响应特性[J]. 光学学报, 2016, **36**(2): 212005.
- [9] XU Jun, YANG Ben-yong, LI Ping-fu, *et al.* Design and finite element analysis of ratioing radiance calibrator on board [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013, **5**: 36-39.
徐骏,杨本永,李平付,等. 比辐射星上定标器结构设计及有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2013, **5**: 36-39.
- [10] LU E, YAN Chang-xiang, WU Qing-wen, *et al.* Research on adaptability on optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(5): 364-376.
卢锴,颜昌翔,吴清文,等. 空间光学遥感器环境适应性设计与试验研究[J]. 中国光学与应用光学, 2009, **2**(5): 364-376.
- [11] WANG Jian-she. Environment experiment of dynamics of space optical subassembly [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **9**(2): 174-176.
王建设. 空间光学组件的动力学环境试验[J]. 光学精密工程, 2004, **9**(2): 174-176.
- [12] LI Zong-xuan. Analysis and test on the response of primary mirror flexure under random vibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(S1): 101-107.
李宗轩. 主反射镜组件柔性环节随机振动响应分析与试验[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(S1): 101-107.
- [13] FENG Wei-quan. Evaluation and validation of space environmental applicability of spacecraft materials [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, **27**(2): 139-143.
冯伟泉. 航天器材料空间环境适应性评价与认定准则研究[J]. 航天器环境工程, 2010, **27**(2): 139-143.
- [14] TONG Jing-yu. A review on spacecraft environment experiments in China and some proposals [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, **25**(03): 237-241.
童靖宇. 我国空间环境试验的现状与发展建议[J]. 航天器环境工程, 2008, **25**(03): 237-241.
- [15] XIONG X, SUN J, ESPOSITO J, *et al.* On-orbit characterization of a solar diffuser's bi-directional reflectance factor using spacecraft maneuvers [C]. SPIE, 2003, **5151**: 375-383.
- [16] LUO Dong-gen, ZOU Peng, CHEN Di-hu, *et al.* Effect of gamma ray irradiation on silicon photodiodes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(3): 0320001.
骆冬根,邹鹏,陈迪虎,等. 伽马射线辐照对硅光电二极管性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(3): 0320001.
- [17] SHI Jia-ding, ZHANG Li-ming, CAO Xing-jia, *et al.* Design and research of diffuser panel used for on-board calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(8): 0828001.
施家定,张黎明,曹兴家,等. 星上定标漫射板设计研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(8): 0828001.