

文章编号 1004-924X(2021)01-0010-11

空间低温绝对辐射初级基准实验特性及 测量精度评估

衣小龙¹, 方 伟¹, 林延东², 王玉鹏¹, 徐 楠², 隋 龙¹, 陈六彪³,
夏志伟¹, 王 凯¹, 叶 新^{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. 中国计量科学研究院, 北京 100029;

3. 中国科学院 低温工程学重点实验室(理化技术研究所), 北京 100190)

摘要:高精度星上辐射基准的建立是提升在轨辐射定标精度的主要技术手段, 本文开展了溯源至国际基本单位制(SI)的空间低温绝对辐射基准研究。自主研制高灵敏度低温绝对辐射探测器, 设计高热阻的探测器与冷指连接结构以提升灵敏度, 通过多级精密温控建立优于 0.4 mK 的高稳定热环境。采用大冷量两级脉冲管制冷机, 通过压缩工质气体的斯特林循环获得 20 K 的深低温工作环境。建立低温绝对辐射测量链路, 评估测量不确定度, 并与国家计量科学研究所的基准低温辐射计进行对比。实验结果表明: 空间低温绝对辐射计实验样机的灵敏度达到 3 565 K/W, 对 0.4 mW 量级激光功率的测量重复性达到 0.017%, 相对标准不确定度为 0.029%; 与基准低温辐射计的归一化偏差为 0.4, 验证了不确定度评估结果的有效性。该工作为研制空间低温绝对辐射计奠定关键技术基础, 对基于绝对探测器的在轨辐射定标方法研究具有重要意义。

关 键 词: 辐射定标; 低温绝对辐射计; 电替代; 不确定度; 间接比对

中图分类号: O536; P414.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3718/OPE.20212901.0010

Experimental characteristics and measurement accuracy evaluation of space cryogenic absolute radiometric primary benchmark

YI Xiao-long¹, FANG Wei¹, LIN Yan-dong², WANG Yu-peng¹, XU Nan², SUI Long¹,
CHEN Liu-biao³, XIA Zhi-wei¹, WANG Kai¹, YE Xin^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

3. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry,
Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: yexin@ciomp.ac.cn

Abstract: The establishment of a high-precision onboard radiometric benchmark is the primary technical

收稿日期: 2020-09-18; **修订日期:** 2020-10-14.

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(No. 2018YFB0504600); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA123703); 国家自然科学基金资助项目(No. 42001316)

means to improve on-orbit radiometric calibration accuracy. The space cryogenic absolute radiometric benchmark traced to the SI has been researched. First, a high-sensitivity cryogenic absolute radiation detector was developed. A high-thermal-resistance heat transfer structure was designed to connect the detector and cold finger to improve sensitivity. A highly stable thermal environment, better than 0.4 mK, was established by multistage precise temperature control. Then, a two-stage pulse tube cooler with a large cooling capacity was used to obtain a working environment of 20 K through a Stirling cycle in which the working fluid gas was compressed. Second, an absolute radiation measurement link was built to evaluate the measurement uncertainty. Finally, an indirect comparison was carried out using the reference cryogenic radiometer of the National Institute of Metrology of China. The experimental results illustrate that the sensitivity of the space cryogenic absolute radiometer experimental prototype was 3 565 K/W, the repeatability of 0.4 mW laser power measurement was 0.017%, and the relative standard uncertainty was 0.029%. The normalized deviation of the benchmark cryogenic radiometer was 0.4, and the validity of the uncertainty evaluation results was verified. The research lays a key technical foundation for the development of space cryogenic absolute radiometers. It is important to examine on-orbit radiometric calibration methods based on absolute detectors.

Key words: radiometric calibration; cryogenic absolute radiometer; electrical substitution; uncertainty; indirect comparison

1 引言

被地球反射、经大气系统返回空间的太阳辐射包含丰富多变、高度可变的光学信息^[1-2]。在时间序列上系统地、空间解析地观测太阳反射辐射,可为资源探测、陆地环境、气象和大气、海洋水色、地球辐射收支、气候变化等研究提供可靠的支撑数据^[3-4]。1988年,美国国家地质调查局发表了利用航空成像光谱仪(Airborne Imaging Spectrometer, AIS)获取连续光谱图像数据,并开展矿物探测识别及制图的研究结果。这是历史上第一次通过遥感手段获取了目标的特征吸收连续光谱信息,在国际上产生了巨大的影响,被认为是与成像雷达技术并列,自遥感技术问世以来最重大的两项技术突破^[5]。20世纪90年代起,高光谱遥感从航空扩展至航天应用。自1997年8月首颗航天高光谱卫星LEWIS发射以来,航天高光谱遥感技术已走过了20年的发展历程,已成为遥感信息获取的重要技术手段。定量化的光学遥感数据在地球科学、防务安全、深空探测等诸多领域表现优异,不断深入的应用需求促进和引领着技术进步^[6]。

辐射定标是光学遥感载荷研制和在轨运行过程中的关键环节,是获取高质量光学遥感数据

的重要前提^[7]。通过辐射定标可以建立仪器辐射输入量与仪器电子学系统输出之间的数学关系,赋予遥感数据的物理意义。高精度的辐射基准是提升辐射定标水平的关键^[8]。低温绝对辐射计是目前世界公认的光辐射计量基准^[9]。基于低温绝对辐射计基准,美国国家标准及技术研究所(NIST)、德国联邦物理技术研究院(PTB)等机构建立了高精度的实验室辐射定标系统,如太阳总辐照度辐射计定标设备(TRF)、光谱辐照度和辐亮度定标系统(SIRCUS)和光度学可调谐激光装置(TULIP)等^[10-12]。但是,由于遥感器发射时要经历高压、振动等恶劣工况,在轨运行期间长期受太阳辐射、宇宙粒子的冲击,遥感器本身性能会随时间发生衰减,遥感器的光学系统、机械结构、电子学部件等会发生性能改变,导致发射前的实验室定标溯源链路断裂。因此,必须对遥感器进行空间辐射定标,以保证空间光学遥感仪器的测量精度及长期稳定性^[13]。

目前,在轨辐射定标主要有太阳漫反射板、人工光源(标准灯、黑体)、地面校正场等^[14-16]。国际上在轨辐射定标的最高水平以中分辨率成像光谱仪(MODIS)和扫描式可见光红外成像辐射仪(VIIRS)为代表,利用太阳漫反射板定标系统,太阳反射谱段的绝对定标精度为2%~3%^[17-18]。

国内在轨辐射定标水平最高的是风云卫星,太阳反射谱段的在轨绝对定标精度为 $5\%\sim 7\%$ ^[19]。高分辨率光谱成像载荷的应用需求更加广泛,在轨辐射定标难度很大,目前仍未实现高精度的在轨辐射定标,一直是地球观测领域的研究热点之一。21世纪初,英国国家物理实验室(NPL)和美国国家航空航天局(NASA)分别提出陆地和太阳研究的可溯源辐射测量计划(TRUTHS)和气候绝对辐射和折射观测平台(CLARREO),建立高精度空间辐射基准,统一星上辐射标度,实现红外发射谱段、太阳反射谱段、太阳总辐照度和太阳光谱辐照度的高精度测量^[20-21]。同时,我国863计划地球观测与导航专家组提出空间辐射测量基准卫星的概念,通过交叉比对定标传递辐射基准,彻底解决多源遥感数据无法溯源的问题^[22]。

针对星上高精度辐射测量缺少基准的技术难题,借鉴地面辐射定标路线,本文提出基于空间低温绝对辐射计的星上可溯源辐射定标链路,包括空间低温绝对辐射初级基准、基准传递链路和高光谱成像系统。其定标原理如下:以空间低温绝对辐射计为星上初级基准,利用单色光源实现传递辐射计的多光谱功率定标;传递辐射计用于实现功率至辐亮度的高精度转换和测量,建立次级基准;基于全谱段光源的光谱曲线平滑特性,将次级基准通过高光谱曲线重建转换为高光谱辐亮度基准;高光谱辐亮度基准和高光谱成像系统同时观测漫反射板,实现可见近红外谱段的辐射定标。在国家高技术研究发展计划(863计划)等项目的支持下,本课题组已开展了空间低温绝对辐射计的关键技术攻关^[23]。空间低温辐射计是低温20 K运行的电替代绝对辐射计,利用电功率复现入射光功率造成的腔温变化,通过精确测量等效电功率来标定未知的光功率,测量结果直接溯源至国际基本单位制(SI)中的电流。地基低温辐射计通常采用液氮制冷,工作温度为4~10 K,充分发挥材料在低温环境下的高热导率、低比热容等特点。面向在轨工作环境,空间低温辐射计只能采用机械制冷方式。由于制冷机的制冷量与目标温度成反比,为获得较大制冷量,将目标温度提升为20 K。工作温度的提升会降低低温材料的性能,因此增加了低温绝对辐射

探测器的设计难度。为实现空间低温绝对辐射测量,研制了空间低温绝对辐射计实验样机,开展了低温绝对辐射探测器研制、高稳定热环境建立、低温电替代测量算法、性能评估及验证等关键技术攻关。

本文研制了高灵敏度、高吸收比的低温绝对辐射探测器,通过多级传热结构和精密温控建立高稳定热环境。采用大冷量两级脉冲管制冷机,通过压缩工质气体的斯特林循环获得20 K的深低温工作环境。建立低温绝对辐射测量链路,评估测量不确定度,并与国家计量科学研究所的低温辐射计进行间接比对。本研究为可溯源的空间辐射基准建立奠定了关键技术基础,对基于绝对探测器的在轨辐射定标方法研究具有重要意义。

2 低温电替代测量原理

低温绝对辐射计的核心探测器是对入射光具有超高吸收比的黑体腔。黑体腔设计为带斜底面的圆柱体结构,内表面喷涂辐射吸收黑漆。通过仿真分析优化黑体腔的几何尺寸,实验检测吸收比达到0.999 928^[24]。入射的光功率(P_0)被内表面多次反射吸收,转化为黑体腔温升(T_0)。电替代测量原理如图1所示,用电功率引起的腔温变化(T_E)复现光功率造成的腔温变化,根据电替代测量原理,可以通过精密测量电功率(P_E)来标定未知的光功率,即有:

$$P_0 = P_E T_0 / T_E. \quad (1)$$

黑体腔采用无氧铜材料制造,通过不锈钢热连接安装到热沉上。相比于常温常压环境,20 K

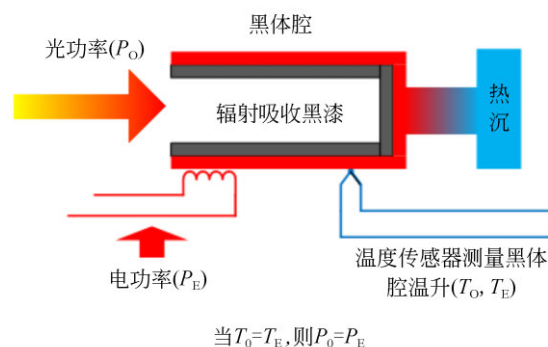


图1 电替代测量原理

Fig. 1 Principle for electrical substitution measurement

的低温真空环境下无氧铜的比热容降低54倍,热导率增加12倍,显著改善了光加热和电加热的等效性。忽略黑体腔上的温度梯度分布,将低温绝对辐射探测器的导热微分方程简化为一维模型,得到:

$$\frac{\partial T(t)}{\partial t} = \frac{\varphi}{\rho c}, \quad (2)$$

其中: $T(t)$ 为 t 时刻黑体腔相对于热沉的温升; c 和 ρ 分别为无氧铜的比热和密度; φ 为黑体腔单位时间、单位体积内热源的生成热,包括光功率或电功率输入热(φ_1)、辐射交换热(φ_2)以及热沉传导热(φ_3)三部分,如下式所示:

$$\varphi_1 = P/V, \quad (3)$$

$$\varphi_2 = P_s/V, \quad (4)$$

$$\varphi_3 = -T(t)/RV, \quad (5)$$

其中: P 是光功率或电功率输入, V 是黑体腔体积, P_s 是辐射交换功率, R 是黑体腔与热沉件的热阻。黑体腔的总热容(C)可通过下式计算:

$$C = \rho c V. \quad (6)$$

将式(3)~式(6)代入式(2)整理得到黑体腔热平衡方程,如下:

$$C \frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{R} = P + P_s. \quad (7)$$

使用初值条件:当 $t=0$ 时,温升 $T(0)=T_0$,求解方程(7)可以得到黑体腔的温度动态响应:

$$T(t) = T_0 + (T - T_0)e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (8)$$

其中: T 为黑体腔平衡状态下的温升, τ 为黑体腔的热时间常数,如下:

$$T = (P + P_s)R, \quad (9)$$

$$\tau = CR. \quad (10)$$

式(9)表明:传热结构设计决定了恒定输入功率对应的平衡温度,热阻 R 越大则温升越大,可降低温度测量系统的设计难度。式(10)表明:传热结构设计还决定了黑体腔的时间常数, R 和 C 越大,时间常数越长,则黑体腔恢复平衡状态需要更多时间,测量周期会变大。黑体腔体积(V)越大,吸收比越高, C 也越大。因此,需要综合考虑吸收比、温升和测量周期等因素设计传热结构。

在实验室环境,黑体腔面对300 K的背景辐射,相比于4 K温区的空间背景辐射,辐射漏热已成为主要的噪声来源之一。地面实验室环境中,

通过多级冷光阑设计,将黑体腔的背景辐射漏热控制在微瓦量级,降低辐射噪声,提升热电重复性。

3 空间低温绝对辐射计实验样机

空间低温绝对辐射计实验样机主要包含低温绝对辐射探测器、两级脉冲管制冷机、测控系统、真空机组和前置光路等部分,如图2所示。自主研制了多级传热结构的低温绝对辐射探测器,通过精密温控建立高稳定热环境。采用数字多用表构建温度、功率等精密测量系统,使用LabVIEW开发了一系列测控软件,实现光功率测量、温度场监测等功能。低温探测器安装在真空室中,通过真空机组建立低于 10^{-4} Pa的真空环境,采用斯特林型脉冲管制冷机建立20 K温区的低温环境。通过空间滤波、功率稳定器等前置光路提升激光稳定度,建立高稳定的待测激光光源。

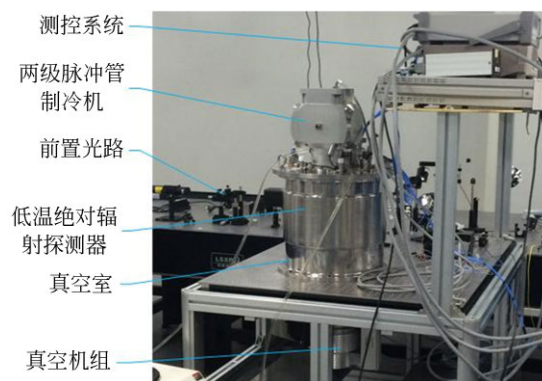


图2 空间低温绝对辐射计实验样机

Fig. 2 Experimental prototype of space cryogenic absolute radiometer

3.1 多级传热结构的低温绝对辐射探测器

黑体腔属于热电型探测器,高稳定的热环境是保证测量精度的关键。制冷机的温度波动是低温绝对辐射探测器的主要噪声来源,降低了黑体腔的温度稳定性。为提升测量重复性,设计了三级传热结构,主要包括无氧铜材料制作的主热沉、控温热沉和低温平台3个组件,各组件间通过不锈钢热连接相连。通过三级传热结构实现黑体腔与制冷机的连接。

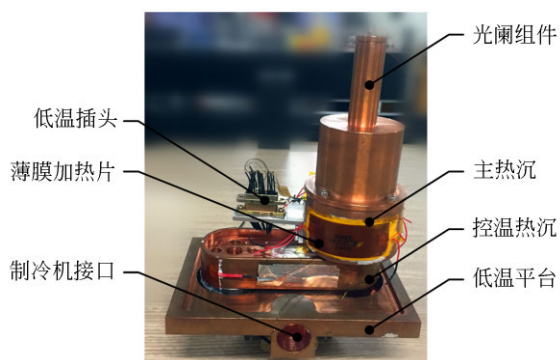


图 3 低温绝对辐射探测器

Fig. 3 Cryogenic absolute radiation detector

在主热沉和控温热沉上建立温控系统,抑制制冷机噪声,为黑体腔提供高稳定的热环境。主热沉和控温热沉是一阶惯性系统,传递函数($G(s)$)如下:

$$G(s) = \frac{R_1}{\tau_1 s + 1}, \quad (11)$$

其中: R_1 是热沉的热阻, τ_1 是热沉的时间常数, s 是拉普拉斯算子。采用PI算法建立温控系统,控制器传递函数($C(s)$)为:

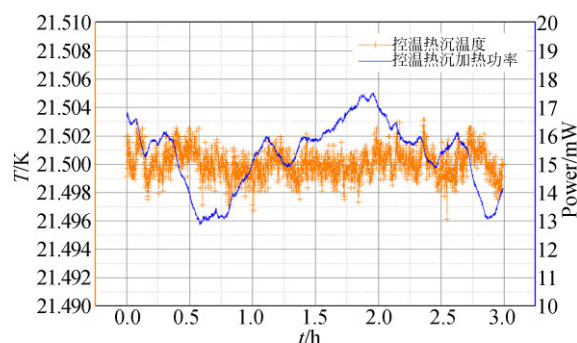
$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} \right), \quad (12)$$

其中: K_p 为控制器的比例因子, K_i 为控制器的积分因子。

为优化控制器因子,首先通过阶跃响应测试获得热沉响应曲线,辨识热沉模型。然后,使用Matlab的Simulink仿真功能优化控制器的调节时间和鲁棒性,得到最佳的控制器参数。模型辨识是提升控制器性能的关键。在控温热沉建立一级温控系统,温度稳定度为6 mK(峰峰值),如图4(a)所示。一级温控提升了主热沉的模型辨识精度,优化了二级温控的稳定度和调节时间。如图4(b)所示,稳定性达到0.4 mK(峰峰值);噪声输入时,控制器迅速降低输出功率,维持主热沉温度稳定。通过多级传热机构和两级温控为黑体腔建立高稳定的低温热环境。

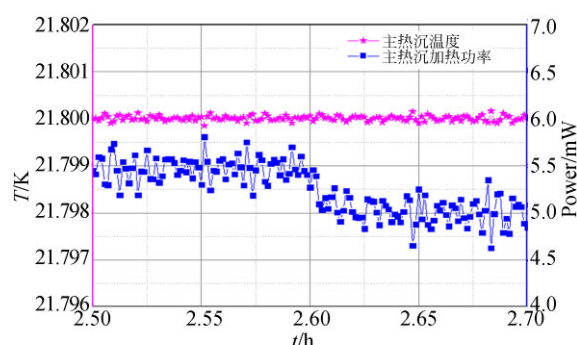
3.2 两级脉冲管制冷机

空间低温绝对辐射计实验样机使用两级脉冲管制冷机获得20 K的工作温度^[25]。如图5所示,脉冲管制冷机采用线性驱动技术,运行频率



(a) 控温热沉温度及加热功率

(a) Temperature control heat sink temperature and heating power



(b) 主热沉温度及加热功率

(b) Primary heat sink temperature and heating power

图 4 热沉温控结果

Fig. 4 Result of heat sink temperature control



图 5 脉冲管制冷机

Fig. 5 Pulse tube refrigerator

高,具有体积小、质量轻、振动小、噪声低和寿命长等优点。为提高制冷机在20 K温区的制冷效率,采用二级机械制冷方式:一级液氮制冷和二级机械制冷。一级制冷系统使用液氮预冷至

80 K温区。实时监控液氮槽内的液氮含量,通过电磁阀、温度传感器、压力传感器以及加热器实现液氮泵的自动控制。二级制冷采用机械制冷方式,通过压缩工质气体的斯特林循环将低温绝对辐射探测器制冷到20 K温区,并提供200 mW的制冷量。

3.3 高精度测控系统

测控系统主要包含高精度测量模块、嵌入式多通道加热模块、上位机和主控软件,如图6所示。高精度测量模块由多台高精度数字多用表构成,基于IEEE标准488协议,实现各仪表的协同测量。研制基于DSP2812的嵌入式系统,实现直流加热、占空比加热、步进电机驱动等功能。使用LabVIEW开发系列主控和温控软件,实现温度场监测、热电重复性测试、热学参数测试和激光功率测量等功能。

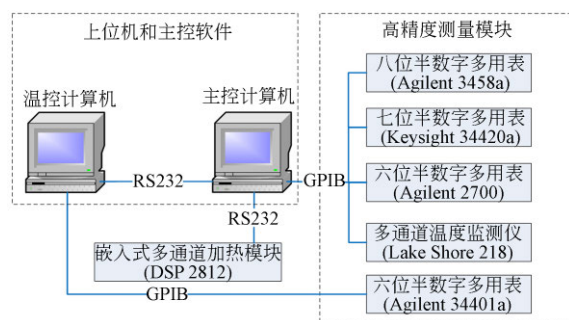


图6 测控系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of measurement and control system

4 实验结果

使用空间低温绝对辐射计实验样机测试系统工作温度,研究低温绝对辐射探测器灵敏度和时间常数的温度特性,在深低温环境下检测电替代测量方法对激光功率的测量重复性。

4.1 工作温度

采用高精度测控系统的温度场测量功能监测低温绝对辐射探测器、二级冷头和一级冷头等的一部分温度。机械制冷机启动后,一级冷头和二级冷头温度逐渐降低,如图7所示。4 h后,一级冷头达到80 K温区,同时二级冷头制冷效率提

高,降温速度加快。10 h后,二级冷头温度达到 (17.923 ± 0.079) K,黑体腔温度达到 (20.835 ± 0.006) K。

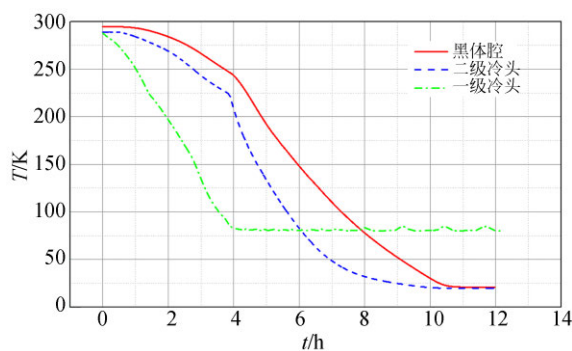


图7 低温辐射计降温过程

Fig. 7 Cooling process of cryogenic radiometer

4.2 灵敏度和时间常数曲线

灵敏度和时间常数是低温绝对辐射探测器的主要热学设计参数。灵敏度是低温绝对辐射探测器的能量输入与温升的关系曲线,取决于热阻设计。低温材料特性随温度变化巨大,导致灵敏度的温度曲线是非线性的。时间常数用于表征建立平衡状态的速度,在阶跃功率作用下,需要10倍时间常数的时间建立热平衡状态。

建立20 K温区高稳定的热环境后,为低温绝对辐射探测器提供一系列不同量值和恒定的电功率(P_N),分别达到热平衡状态并记录热电响应曲线,温升分别(ΔT_N)。温度的灵敏度($R(T)$)为:

$$R(T) = \frac{\Delta T_N}{P_N} \quad (13)$$

根据热电响应曲线,采用最小二乘法计算不同温度的时间常数($\tau(T)$)。低温绝对辐射探测器的灵敏度曲线和时间常数曲线如图8所示。实验结果表明:当工作温度为22 K时,低温绝对辐射探测器的灵敏度为3 565 K/W,时间常数为24.51 s;工作温度每升高1 K,灵敏度减小2.2%,时间常数增加1.9%。该结果为面向不同应用的低温绝对辐射探测器设计提供了数据支撑。灵敏度曲线可应用于测量激光功率、预测电定标功率和修正测量结果。

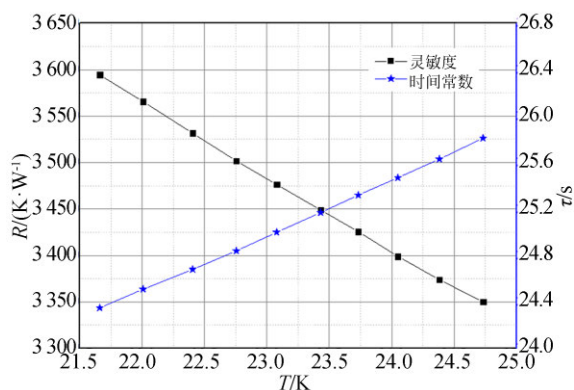


图8 不同温区的灵敏度和时间常数

Fig. 8 Sensitivity and time constant in different temperature regions

4.3 激光功率测量

空间低温绝对辐射计实验样机采用一次电定标方法测量激光功率。一次电定标方法测量过程包含光功率观测和电定标两个阶段。

在光功率观测阶段,打开快门,黑体腔接收光功率,同时加热器输出电功率(P_1)维持热平衡状态,获得平衡温度 T_1 。

在电定标阶段,关闭快门,根据灵敏度曲线和 T_1 预测电定标功率(P_2),加热器输出 P_2 ,以复现光功率造成的温升变化,获得平衡温度为 T_2 。

T_1 和 T_2 存在微小偏差,使用灵敏度曲线修正该偏差。光功率(P_0)通过下式计算:

$$P_0 = \frac{P_2 - P_1 - R(T_2 - T_1)}{\alpha\eta N}, \quad (14)$$

其中: α 为吸收比, η 为杂散光修正系数, N 为光电不等效修正系数。采用四线法精密测量式(14)中的电功率,在加热回路中串联标准电阻 R_B ,分别测量标准电阻(V_{R1} , V_{R2})和加热器两端电压(V_{H1} , V_{H2}),通过下式计算电功率:

$$P_1 = \frac{V_{H1}V_{R1}}{R_B}, \quad (15)$$

$$P_2 = \frac{V_{H2}V_{R2}}{R_B}. \quad (16)$$

将式(15)和式(16)带入式(14)并整理得到空间低温绝对辐射计实验样机的测量链路,如下:

$$P_0 = \frac{(V_{H2}V_{R2} - V_{H1}V_{R1})/R_B - R(T_2 - T_1)}{\alpha\eta N}. \quad (17)$$

使用氦氖激光器作为测试光源,通过起偏器、空间滤波器、功率稳定器、衰减片和半透半反镜等,将光源功率量级调制为 0.4 mW,稳定度优于 0.01%。在相同条件下,空间低温绝对辐射计实验样机重复测量激光功率,用相对实验标准差表征测量重复性。对 0.4 mW 量级激光功率,空间低温绝对辐射计实验样机的测量结果为 $(0.420\ 26 \pm 0.000\ 07)$ mW (1σ),相对测量重复性达到 0.017%,如图 9 所示。

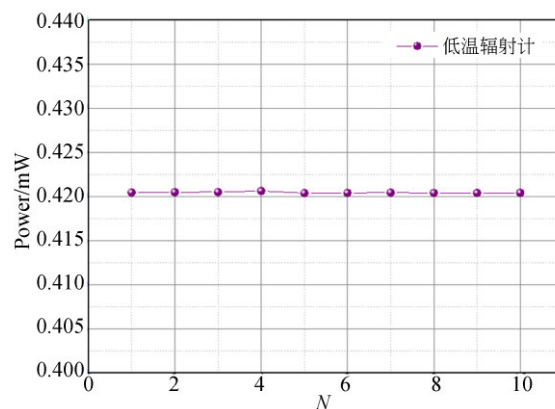


图9 激光功率测量结果

Fig. 9 Measurement results of laser power

5 测量精度评定

对空间低温绝对辐射计实验样机的测量不确定度进行自评定,并通过间接比对验证评定结果的有效性。

5.1 不确定度评定

根据《JJF 1059.1-2012 测量不确定度评价与表示》,评定空间低温绝对辐射计实验样机的不确定度。A类不确定度(u_A)用光功率测量重复性表征。对式(17)中各输入量求偏微分,得到各个输入量的灵敏系数,从而计算B类标准不确定度(u_B)。因此,激光功率测量的合成标准不确定度为:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{\begin{aligned} &u^2(P_O) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial V_{H1}}\right)^2 u^2(V_{H1}) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial V_{R1}}\right)^2 u^2(V_{R1}) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial V_{H2}}\right)^2 u^2(V_{H2}) + \\ &\left(\frac{\partial P_O}{\partial V_{R2}}\right)^2 u^2(V_{R2}) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial R_B}\right)^2 u^2(R_B) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial R}\right)^2 u^2(R) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial T_1}\right)^2 u^2(T_1) + \\ &\left(\frac{\partial P_O}{\partial T_2}\right)^2 u^2(T_2) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial \alpha}\right)^2 u^2(\alpha) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial \eta}\right)^2 u^2(\eta) + \left(\frac{\partial P_O}{\partial N}\right)^2 u^2(N) \end{aligned}} \quad (18)$$

不确定度评估结果如表1所示,测量重复性为0.000 07 mW。电压、电阻和温度使用数字多用表直接测量,提升绝对测量精度。低温绝对辐射探测器的热阻通过热电实验测量,测量不确定度为0.25 K/W。使用替代法测得低温绝对辐射探测器的吸收比为0.999 928 ($\lambda=632.8$ nm),测量不确定度为0.000 078^[26]。仿真分析结果表明,低温辐射计光电不等效修正系数为1,不确定度为0.000 005^[27]。实验检测得到杂散光功率的修正系数为1.000 06,不确定度为0.000 045。合成后得到空间低温绝对辐射计实验样机的相对不确定度为0.029%。

表1 空间低温绝对辐射计样机的不确定度评估

Tab. 1 Uncertainty evaluation of space cryogenic absolute radiometer prototype

参 数	典型值	不确定度
测量重复性/mW	0.420 46	0.000 07
加热器电压/V	0.907 60	0.000 04
标准电阻电压/V	0.434 31	0.000 02
标准电阻阻值/ Ω	1 000.155	0.006
黑体腔温度/K	22.755 02	0.000 01
热阻/(K·W ⁻¹)	3 565.65	0.25
吸收比	0.999 928	0.000 078
光电不等效	1	0.000 005
杂散光功率	1.000 063	0.000 045
合成不确定度/mW	0.000 12	
合成相对不确定度	0.029%	

5.2 间接比对

为验证不确定度评估结果的有效性,将空间低温绝对辐射计实验样机与中国计量科学研究所的基准低温辐射计进行了间接比对。以陷阱探测器为传递标准器,波长为632.8 nm的氦氖

激光器作为比对光源,空间低温绝对辐射计实验样机和基准低温辐射计分别在各自实验室测量传递标准器的响应度(Y_1 和 Y_2)。响应度是输入光功率与输出电流的响应关系。依据《JJF 1117-2010 计量比对》,用归一化偏差 E_n 评定间接比对结果, E_n 为:

$$E_n = \frac{Y_1 - Y_2}{ku}, \quad (19)$$

其中: k 是覆盖因子, u 是 Y_1 、 Y_2 的合成不确定度,通过下式计算:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}, \quad (20)$$

其中: u_1 是 Y_1 的标准不确定度, u_2 是 Y_2 的标准不确定度。由于传递标准器处于真空室外,空间低温绝对辐射计实验样机的测量结果需要修正窗口透过率。预先标定空间低温绝对辐射计实验样机的窗口透过率为0.961 80。空间低温绝对辐射计实验样机对传递标准器的响应度测量结果为 $Y_1=0.508 36$ A/W,如表2所示。基准低温辐射计对传递标准器的响应度测量结果为 $Y_2=0.508 43$ A/W,计算得到 $E_n=0.4$ 。依据《JJF 1117-2010 计量比对》,归一化偏差的绝对值小于1,说明空间低温绝对辐射计实验样机测量不确定度的评估结果是有效的。

表2 传递标准器响应度的标定结果

Tab. 2 Calibration results of transfer standard responsivity

测量次数	空间低温绝对辐射计实验样机	基准低温辐射计
1	0.508 31	0.508 41
2	0.508 39	0.508 43
3	0.508 32	0.508 42
4	0.508 38	0.508 42
5	0.508 36	0.508 44
6	0.508 38	0.508 43
平均值	0.508 36	0.508 43

6 结 论

本文为研究溯源国际基本单位制(SI)的空间低温绝对辐射测量技术,研制了空间低温绝对辐射计实验样机。自主研制低温绝对辐射探测器,采用三级传热结构实现黑体腔与制冷机的连接,两级脉冲管制冷机为探测器提供 20 K 的工作环境。通过两级温控系统抑制制冷机噪声,建立 0.4 mK 的高稳定低温热环境。该探测器在 22 K 工作温度下的灵敏度达到 3 565 K/W,时间常数为 24.51 s。工作温度每升高 1 K,灵敏度减小 2.2%,时间常数增加 1.9%。实验结果为面向不同应用的低温绝对辐射探测器设计提供了数据支撑。

根据《JJF 1059.1-2012 测量不确定度评价与表示》,空间低温绝对辐射计实验样机相对合成

标准不确定度为 0.029%。空间低温绝对辐射计实验样机与中国计量科学研究所的基准低温辐射计对传递标准器的响应度测量结果的归一化偏差 E_n 为 0.4。依据《JJF 1117-2010 计量比对》,归一化偏差绝对值小于 1,说明空间低温绝对辐射计实验样机不确定度的评估结果是有效的。研究工作不仅为空间低温绝对辐射测量技术研究奠定了理论和实验基础,解决了低温绝对辐射探测器研制、高稳定热环境建立、低温电替代测量、不确定度评定、间接比对验证等关键技术;还为基于探测器的在轨辐射定标方法研究提供了关键技术支撑。建立可溯源的空间低温辐射基准将显著提升星上辐射定标精度,对高光谱辐射遥感具有重要意义,从而满足气候变化、地球辐射收支等研究领域对高光谱辐射遥感数据的需求。

参考文献:

- [1] LOEB N G, WIELICKI B A, DOELLING D R, *et al.*. Toward optimal closure of the earth's top-of-atmosphere radiation budget [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 748-766.
- [2] SCHLIFKOWITZ U, FINSTERLE W, SCHMUTZ W. Development of a phase-sensitive absolute radiometer for space and ground-based use [J]. *Noordwijk*, 2005:467-469.
- [3] BAUM B A, WIELICKI B A. Cirrus cloud retrieval using infrared sounding data: multilevel cloud errors[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(1): 107-117.
- [4] MCCLAIN C R, SIGNORINI S R, CHRISTIAN J R. Subtropical gyre variability observed by ocean-color satellites[J]. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 2004, 51(1/2/3): 281-301.
- [5] 孙林, 鲍金河. 航空成像光谱仪的发展和在侦察中的应用[J]. *遥感信息*, 2010, 25(6): 115-119.
SUN L, BAO J H. Study on imaging spectrometer in the applications of aviation imaging reconnaissance [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(6): 115-119. (in Chinese)
- [6] 王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010008.
WANG Y M, LANG J W, WANG J Y. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010008. (in Chinese)
- [7] BARNES R A, BARNES W L, LYU C H, *et al.*. An overview of the visible and infrared scanner radiometric calibration algorithm[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(4): 395-405.
- [8] 王玉鹏, 胡秀清, 王红睿, 等. 可在轨溯源的太阳反射波段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1807-1812.
WANG Y P, HU X Q, WANG H R, *et al.*. Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1807-1812. (in Chinese)
- [9] 庞伟伟, 郑小兵, 李健军, 等. 低温绝对辐射计不同定标光路的比对实验[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0317004.
PANG W W, ZHENG X B, LI J J, *et al.*. Comparison experiment of cryogenic radiometer of differ-

- ent calibration optical path[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0317004. (in Chinese)
- [10] KOPP G, HEUERMAN K, HARBER D, *et al.*. The TSI Radiometer Facility: absolute calibrations for total solar irradiance instruments[C]. *Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 6677, Earth Observing Systems XII, San Diego, California, USA*, 2007, 6677: 667709.
- [11] ZENG J, YOON H W, EPELDAUER G P, *et al.*. Spectral irradiance responsivity calibration of InSb radiometers using the improved IR-SIRCUS at NIST[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7453: 74530N-74530N-12.
- [12] SCHUSTER M, NEVAS S, SPERLING A. Validation of short-pulse-laser-based measurement setup for absolute spectral irradiance responsivity calibration[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(13): 2815-2821.
- [13] HU X Q, XU N, WENG F Z, *et al.*. Long-term monitoring and correction of FY-2 infrared channel calibration using AIRS and IASI[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(10): 5008-5018.
- [14] LEI N, WANG Z P, XIONG X X. On-orbit radiometric calibration of Suomi NPP VIIRS reflective solar bands through observations of a sunlit solar diffuser panel[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(11): 5983-5990.
- [15] MURAKAMI H, TADONO T, IMAI H, *et al.*. Improvement of AVNIR-2 radiometric calibration by comparison of cross-calibration and onboard lamp calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 4051-4059.
- [16] 漆成莉, 周方, 吴春强, 等. 风云三号红外高光谱探测仪的光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4): 747-755.
- QI CH L, ZHOU F, WU CH Q, *et al.*. Spectral calibration of Fengyun-3 satellite high-spectral resolution infrared sounder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(4): 747-755. (in Chinese)
- [17] XIONG X, BARNES W, CHIANG K, *et al.*. Status of Aqua MODIS on-orbit calibration and characterization[J]. *SPIE*, 2004, 5570: 317-327.
- [18] XIONG X X, BUTLER J, CHIANG K, *et al.*. VIIRS on-orbit calibration methodology and performance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(9): 5065-5078.
- [19] XU N, CHEN L, HU X Q, *et al.*. Assessment and correction of on-orbit radiometric calibration for FY-3 VIRR thermal infrared channels[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(4): 2884-2897.
- [20] FOX N P, AIKEN J, BARNETT J J, *et al.*. Traceable radiometry underpinning terrestrial- and helio-studies (TRUTHS)[C]. *International Symposium on Remote Sensing. Proc SPIE 4881, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI, Crete, Greece*. 2003, 4881: 395-406.
- [21] ROITHMAYR C M, LUKASHIN C, SPETH P W, *et al.*. CLARREO approach for reference intercalibration of reflected solar sensors: on-orbit data matching and sampling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6762-6774.
- [22] 卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 等. 中国空间辐射测量基准技术[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6): 672-680.
- LU N M, DING L, ZHENG X B, *et al.*. Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(6): 672-680. (in Chinese)
- [23] YE X, YI X L, FANG W, *et al.*. Design and investigation of absolute radiance calibration primary radiometer[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2018, 12(8): 994-1000.
- [24] YI X L, YANG Z L, YE X, *et al.*. Absorptance measurement for sloping bottom cavity of cryogenic radiometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2733.
- [25] 陈六彪, 周强, 朱啸爽, 等. 轻量化 20 K 以下温区斯特林型脉管制冷机[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(5): 858-861.
- CHEN L B, ZHOU Q, ZHU X SH, *et al.*. Lightweight stirling-type pulse tube cryocooler with temperature below 20 K[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(5): 858-861. (in Chinese)
- [26] 高鑫, 王凯, 方伟. 太阳辐照度绝对辐射计吸收

腔结构优化[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 624-631.

GAO X, WANG K, FANG W. Optimization on the structure of the absorption cavity of solar irradiance absolute radiometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(3): 624-631. (in Chinese)

[27] 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, 2014.

FANG Q Q. *Research of the Blackbody Cavity and Nonequivalence of Spatial Cryogenic Radiometer* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

作者简介:



衣小龙(1988—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2011年于中国地质大学(武汉)获得学士学位,2016年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间低温辐射计、总辐照度定标方面的研究。E-mail: yxl19880603@126.com

通信作者:



叶新(1979—),男,吉林省吉林市人,研究员,博士,2005年于中国科学技术大学获得硕士学位,2019年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学研究一部主任,主要从事星上辐射定标、太阳总辐照度测量方面的研究。E-mail: yexin@ciomp.ac.cn