

文章编号: 1000-7032(2019)08-4015-07

空间低温绝对辐射计研究

吴 铎^{1,2}, 王 凯¹, 叶 新^{1*}, 王玉鹏¹, 方 伟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: 为满足空间遥感器在轨辐射定标精度和溯源性的需求, 中科院长春光机所研制了空间低温绝对辐射计。本文介绍了实验室辐射基准的低温辐射计的发展现状, 并着重介绍了我们研制的空间低温绝对辐射计的设计方案。空间低温绝对辐射计采用斯特林机械制冷机提供 20 K 工作环境, 通过优化吸收腔结构和热连接, 设计出响应度 0.2 K/mW 和 1 K/mW 的总腔和光谱腔。采用闭环高精度温度控制和两次电定标的电替代测量方式, 利用探测器材料在低温下的优异热性能, 实现总腔 0.02% 精度水平的光功率测量, 建立辐射基准。并采用温度比对的方式, 将辐射基准传递给光谱腔, 实现溯源至国际单位制基本单位的光谱辐射测量, 为遥感器在轨可溯源的光谱辐射定标提供重要的技术储备。

关键词: 辐射基准; 辐射定标; 可溯源; 低温辐射计

中图分类号: TB96 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20194008.1015

Space Cryogenic Absolute Radiometer

WU Duo^{1,2}, WANG Kai¹, YE Xin^{1*}, WANG Yu-peng¹, FANG Wei¹

(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: newsyears@ustc.edu

Abstract: The space cryogenic absolute radiometer (SCAR) is developed at Changchun institute of optics, fine mechanics and physics, in order to satisfy the demands of accuracy and traceability of onboard radiance calibration of spaceborn remote sensors. In this paper, the design decision of SCAR was introduced with emphasis, based on the brief introduction of the state-of-the-art of the cryogenic radiometer benchmark. The working environment of 20 K of SCAR was supplied by a stirling-type cryocooler. The responsivities of total cavity and spectral cavity were designed to be 0.2 K/mW and 1 K/mW by optimizing the structures of cavities and thermal links. The radiance benchmark can be founded by the optical power measurement of 0.02% accurate, which was ensured by close-loop high precision temperature control and electrical substitution measurement procedure with twice electrical heating, as always as the excellent thermal properties of detectors at low temperatures. The radiance standard was transferred to the spectral cavity through temperature comparing, in order to realize the traceable spectral radiometric measurement. This work affords technical reserve for the traceable spectral radiance calibration of spaceborn remote sensors.

Key words: radiance benchmark; radiance calibration; traceability; cryogenic radiometer

收稿日期: 2018-09-07; 修订日期: 2018-10-17

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504600 2018YFB0504603) 资助项目

Supported by National Key Research Development Program(2018YFB0504600 2018YFB0504603)

1 引 言

空间遥感在国民经济建设和国家安全等多个领域有重要的应用背景。空间遥感能够对地球的陆地、海洋、大气等进行连续的覆盖全球的观测,其获取的遥感信息在资源勘探、国土治理、城市管理、环境监测与污染防治、气象预报等领域有重要的应用价值。由于各传感器功能和寿命的原因,很多情况下需要综合利用多个卫星平台的传感器获得的数据进行长期变化趋势的研究^[1-2],例如,在全球气候变化和温室气体监测领域,一方面要求辐射定标标准有较低的不确定度,太阳总辐照度测量的不确定度 0.01%,光谱辐照度测量不确定度 0.1%,遥感目标的反射太阳光谱辐亮度测量不确定度 0.3%^[3];另一方面要求不同卫星平台的传感器的测量数据可溯源至国际单位制(SI),以便于不同传感器测量数据的相互比对,这就对传感器的在轨辐射定标提出了很高的要求^[4-5]。辐射定标在赋予遥感数据物理意义的同时,也要为不同传感器提供共同的辐射标度。但是目前的传感器在轨辐射定标方法中星上定标器由于受到发射过程和空间环境的影响,其辐射标度不再与国际单位制有直接测量链的联系。而场地替代定标使用的地面辐射校正场和月球表面反射辐亮度需要高精度的表征测量,目前的测量精度还没有达到要求^[2,6]。

国家计量标准实验室的地面辐射计量标准经历了从上世纪六十年代的黑体辐射标准源、七十年代的常温电替代绝对辐射计到八十年代的低温辐射计三个阶段,精度从 1% 提高到 0.02%^[7]。低温辐射计主要有机械制冷型和液氮制冷型两种。其中的机械制冷低温辐射计只在英国国家物理实验室(NPL)运行,其他国家的低温辐射计国家标准均为液氮制冷低温辐射计。商业化的低温辐射计产品出现后使得低温辐射计这一辐射度国家标准得到更广泛的普及。目前主要提供低温辐射计的公司有英国的牛津仪器和美国的 L-1 公司。低温辐射计国家标准的普及推动了空间光学遥感仪器发射前的实验室定标精度和向国际单位制基本单位的溯源精度的提高。但是,遥感仪器在轨运行中由于受到发射过程和空间环境与条件的影响,在轨辐射定标精度远远没有满足需求。借鉴实验室辐射基准建立和传递的技术路线,

NPL 的 Fox 教授领导的研究组提出了 TRUTH 计划^[8],在机械制冷低温辐射计的基础上研制空间的低温绝对辐射计基准和定标系统,旨在提高遥感仪器在轨辐射定标精度和溯源性。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所是国内唯一开展星载太阳辐照度绝对辐射计研制的单位,研制的太阳辐射监测仪搭载在风云三号系列卫星上进行了多年的太阳总辐射测量^[9-10]。目前借助国家自然科学基金科学仪器基础研究专款的支持正在进行空间低温绝对辐射计的研发工作,提出了研究方案,研制了仪器的原理样机并且开展了一系列的测试工作,为未来适合空间使用的辐射基准的研制打下了技术基础。空间低温绝对辐射计采用电功率替代光功率的方式进行辐射测量,是目前精度最高的辐射测量仪器,不需要与其他仪器进行比对,只需要对自身仪器的参数进行修正。

本文在系统介绍两种典型的低温辐射计基准和 TRUTH 计划中的低温太阳绝对辐射计的基础上,详细介绍了长春光机所研制的空间辐射基准的系统组成、工作原理、仪器设计和技术指标等。

2 三种典型的低温辐射计基准

2.1 英国国家物理实验室(NPL)的机械制冷低温辐射计(MCR)

二十世纪七十年代末,NPL^[11]的 Quinn 和 Martin 为了测量玻尔兹曼常数设计了 Q-M 计,之后 Martin 和 Key 将低温黑体和低温辐射计分离,发展了作为光功率基准的 P-S 计,并且对腔体进行了改进设计,窗口位置采用布儒斯特窗。该技术转让给牛津仪器公司后,逐渐形成了牛津仪器公司的 Radiox 系列的低温辐射计。这类低温辐射计采用液氮制冷,由于受到液氮杜瓦体积的限制,冷却系统运行时间有限制。

NPL 和牛津仪器公司在机械制冷机发展的基础上,设计建造了机械制冷低温辐射计(MCR)^[12]。如图 1 所示,MCR 的低温由一个商用两级冷头和压缩机组成的制冷机提供,其中的一级冷头 30 K,二级冷头 13 K。MCR 的核心探测单元经过一个不锈钢热阻连接在二级冷头上。核心探测单元的外围防辐射保温屏分别被一级冷头和二级冷头冷却至 30 K 和 13 K。

MCR 的核心探测单元包括参考热沉、吸收腔

以及吸收腔热连接。参考热沉由铜制成,其温度经过高精度的 PID 控制在 15 K,温度稳定性为 1×10^{-6} 。PID 控制的温度监视是由薄膜 RhFe 电阻温度传感器和高精度电桥组成,其反馈加热部分由薄膜加热片和高分辨率电流源组成。PID 温控的测量周期被反复优化以达到去除制冷机带来的温度起伏的目的。吸收腔由高导无氧铜电镀制成,厚度 0.1 mm,腔体侧壁是被切顶的圆锥体,平均直径 10.5 mm,长度 40 mm。腔体内侧壁涂覆漫反射铂黑,底面涂覆镍磷黑。整个腔体重 6 g,

吸收率经测算为 0.999 98。吸收腔温度测量由贴在腔体后面的薄膜 RhFe 电阻温度传感器完成,腔体的加热片贴在腔体的斜切底面,加热片阻值 1 k Ω 。吸收腔热连接决定了吸收腔的响应度和时间常数。热连接由三层不锈钢薄壁管组成,MCR 的吸收腔热连接能够获得 0.6 K/mW 的吸收腔响应度,腔体时间常数 30 s。

另外,MCR 还包括各种真空阀门和布儒斯特窗口,为探测器提供真空环境和接近 1 的偏振激光透过率。

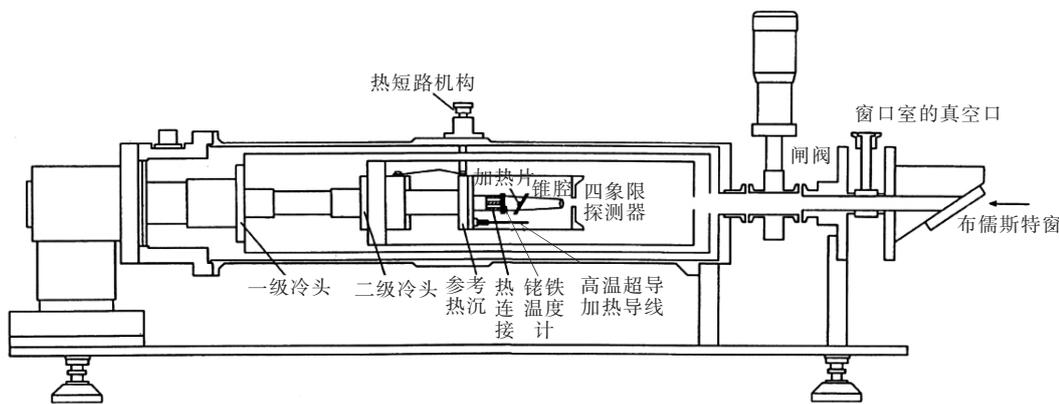


图 1 NPL 的 MCR 结构示意图^[10]

Fig.1 Schematic drawing of MCR^[10]

2.2 美国标准技术研究院 (NIST) 的高精度低温辐射计 HACR

为了提高辐射基准的精度水平和光谱范围,美国标准技术研究院 (NIST) 研制了高精度低温辐射计 (HACR)^[7]。其结构如图 2 所示。HACR 由液氦制冷,工作温度 4.2 K。工作压强 10^{-5} Pa,通过分子泵获得。为了将辐射计内部的辐射换热过程降到最低,HACR 的核心探测单元被 4 层防辐射屏包围,其中最内两层连接在 4.2 K 的液氦杜瓦上,最外层连接在 77 K 的液氮杜瓦上,之间还有一层温度介于液氦和液氮之间。

HACR 的吸收腔经过一个薄壁不锈钢管连接在参考块上,不锈钢管作为吸收腔和参考块之间的热阻能够实现 1 K/mW 的腔体响应度。参考块与液氦杜瓦相连,其温度经由高精度温控系统控制在 5 K。参考块的高精度温控系统包括铂电阻温度传感器、绕线式电加热器和一个商用的温度测量与控制单元组成,能够实现 150 ~ 350 μ K 的参考块温度稳定度控制。

HACR 的吸收腔是长 15 cm、直径 5 cm 的电

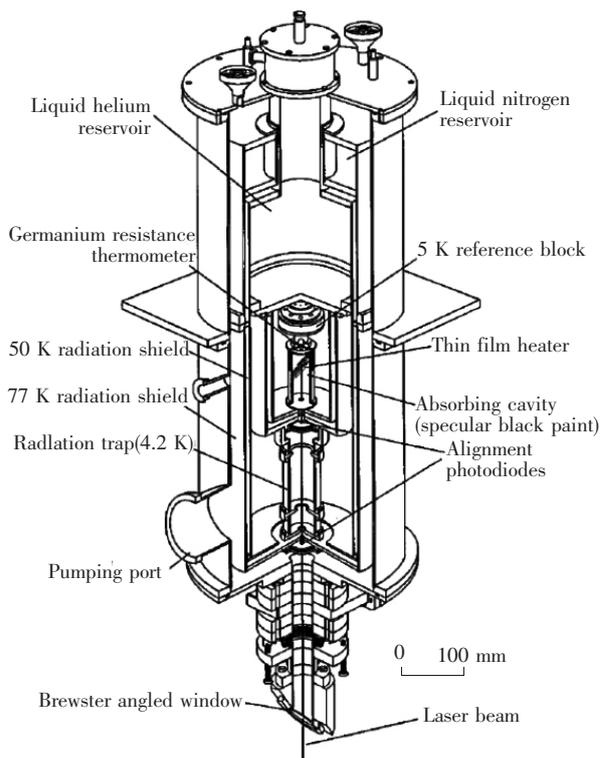


图 2 美国 NIST 的高精度低温辐射计 HACR^[7]

Fig.2 Overview of HACR of NIST^[7]

镀铜圆柱腔,腔底面是与圆柱中轴线呈 30° 角的斜切面。吸收腔的圆柱侧面内壁涂覆镜面反射吸收黑,底面内壁涂覆漫反射吸收黑,黑漆为 Chem-glaze Z302。该吸收腔能够实现 632.8 nm 激光的 99.998% 吸收率。

HACR 为立式结构,液氮制冷器在其上方,入光窗口在下方。窗口是直径 50 mm 、厚度 6 mm 的熔石英布儒斯特窗,方向可调。激光经过布儒斯特窗进入 HACR 后,沿着光束定线探测器确定的光路射入黑体腔。光束定线探测器是分别放置在两层防辐射屏上的中间带孔的四象限探测器,这两个孔确定的直线与吸收腔中轴线一致。两孔之间是消杂光光阑。

NIST 为 HACR 的高精度测量进行了系统的实验测试,确定了 HACR 的测量模式,并对其测量精度进行了评估,在对 0.8 mW 光功率测量时能够实现 0.021% 的合成不确定度。之后在 HACR 的基础上,NIST 研制了模块化的初级光功率辐射计 POWR^[13],POWR 采用卧式结构,即光路方向水平设置。模块化设计能够在不同的测量需求下方便地更换核心探测单元,其光功率测量精度达到 0.01% 水平。

2.3 英国国家物理实验室(NPL)的低温太阳绝对辐射计 CSAR

为了在轨可溯源至国际单位制基本单位的遥感器绝对辐射定标,NPL 提出了以低温太阳

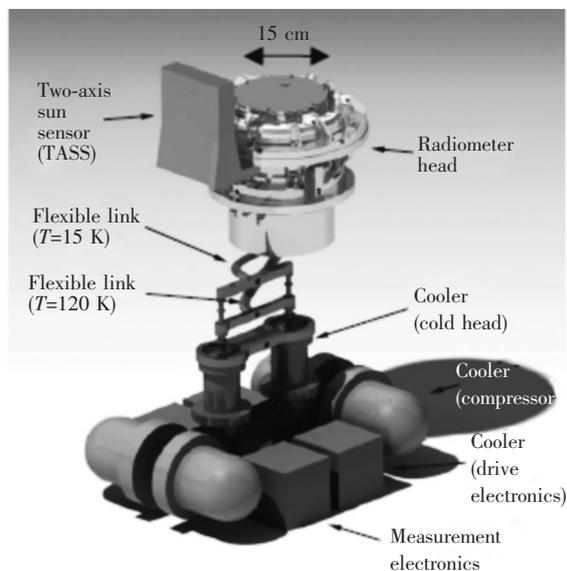


图 3 CSAR 系统示意图^[3]

Fig. 3 Sketch map of CSAR^[3]

绝对辐射计(CSAR)为核心的 TRUTHS 计划^[3]。CSAR 采用两级机械制冷,为核心探测单元提供 20 K 的工作温度。如图 3,CSAR 的核心探测单元包含测量太阳总辐照度的 TSI 腔和传递太阳光谱辐照度标准的高响应度腔(HS 腔)。其中的 TSI 腔能够实现 0.02% 精度水平的太阳总辐照度测量,以太阳总辐照度建立辐射基准。利用 CSAR 定标光学遥感器时,由于光学遥感器的分波段探测,需要对太阳光谱进行细分测量,建立太阳光谱辐射标准。CSAR 建立太阳光谱辐射标准是通过 HS 腔实现的。由于太阳光谱辐射在较窄带宽时,辐射强度较小,CSAR 的 HS 腔的温度随光功率的响应度要足够高,才能实现定量测量。通过优化吸收腔结构和重量以及向参考热沉的热连接,CSAR 的 HS 腔探测功率动态范围设计为 $10\ \mu\text{W} \sim 1\text{ mW}$ 。

3 中国科学院长春光机所(CIOMP)的空间低温辐射计 SCAR

中国科学院长春光机所在多年绝对辐射计和太阳总辐照度监测仪研制基础上^[9-10,14-15],提出了研制中国的空间辐射基准——空间低温绝对辐射计计划,得到了国家自然科学基金科学仪器基础研究专款的支持,开展了原理样机的设计和研制。以此为基础,又提出了空间遥感可溯源的辐射基准及其定标传递链,为在轨直接溯源至国际单位制基本单位的辐射定标进行了先期研究,以期待建立我国独立自主的空间辐射基准实验室,将我国的遥感器在轨辐射定标精度提高一个数量级,满足国民经济各部门对遥感数据精度和溯源性的需求。

3.1 系统结构

空间低温绝对辐射计样机示意图见图 4。由斯特林两级机械制冷机提供 20 K 的工作环境,工作在 20 K 的探测器组件被液氮预冷屏包围,首先被其预冷至液氮温度。整个低温部分均被密封在真空室中,由德国莱宝公司 MAG600i 磁悬浮分子泵和 SC30D 干泵组成的无油真空机组将真空室真空度抽至 10^{-3} Pa ,经过降温后,系统内部真空度能够达到 10^{-5} Pa 。空间低温辐射计探测器吸收腔水平放置,入光孔设置在辐射计侧面。真空室上的入光孔预留接口法兰,为光束准直以及后续的传递辐射计舱室提供接入条件。

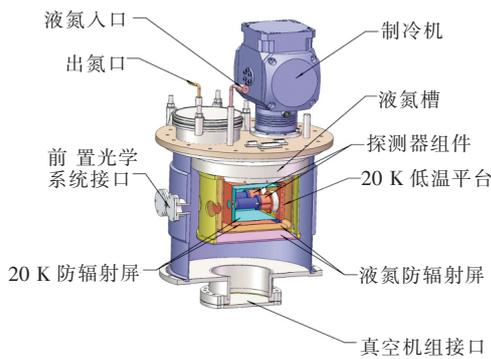


图 4 空间低温绝对辐射计样机

Fig. 4 Prototype of the space cryogenic absolute radiometer

为了提高制冷机在 20 K 的制冷效率,空间低温辐射计中没有使用制冷机一级冷指进行防辐射屏制冷和系统预冷,而是采用液氮制冷方式。2.5 L 的液氮槽配有液氮入口和出氮口,由自动泵氮器将液氮从液氮罐中泵入,自动液氮泵的触发信号由液氮槽上的温度传感器提供。连接在液氮槽上的两层防辐射屏被冷却至 80 K。20 K 两级斯特林制冷机由中科院理化技术研究所提供,由压缩机和冷头组成,通过工质气体的斯特林循环实现对冷指的制冷。制冷机的二级冷指连接低温平台,将平台制冷至 20 K,自身的闭环温控能够使冷指温度稳定在 $20\text{ K} \pm 10\text{ mK}$ 。辐射计的探测器组件安装在平台上,外围有两层防辐射屏。

辐射计的探测器组件结构见图 5,由热沉、吸收腔以及二者之间的热连接(图中的热连接 2)组成。为了在热沉上进行主动温控,热沉与低温平台之间用不锈钢热连接 1 相连,将热沉温度抬高 1 K。热沉上有进行温度控制用的铂电阻温度传

感器和低温电加热器。空间低温辐射计的探测器包括测量太阳总辐照度的总腔和定标太阳光谱辐照度的光谱腔。总腔是电替代腔,包括温度传感器和电加热器,总腔由高导无氧铜经电镀制成,形状为斜切地面圆柱腔,其与热沉的热连接由不锈钢制成。腔体和热连接的尺寸设计综合考虑了腔体响应度(0.2 K/mW)、时间常数(10 s)以及腔体吸收率(优于 0.999 9)等。要求总腔对光辐射功率测量的合成不确定度优于 0.02%。考虑到光谱腔由于响应度、质量以及与总腔的定标方式,光谱腔不是电替代腔,没有电加热器。光谱腔响应度 1 K/mW ,时间常数 0.5 s,采用圆锥腔设计,其热连接的热阻远大于总腔热连接热阻。在轨运行时,首先总腔对太阳总辐照度进行测量,然后通过 HS 腔快速定标太阳光谱辐照度(光谱范围 $0.2 \sim 2.5\ \mu\text{m}$)。HS 腔的定标精度为 0.2%。

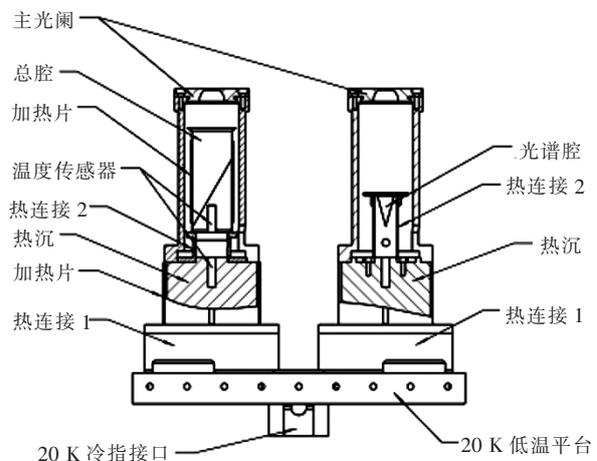


图 5 空间低温绝对辐射计的核心探测单元

Fig. 5 Detective unit of the space cryogenic absolute radiometer

3.2 测量流程

空间低温绝对辐射计包括测量太阳总辐照度的总腔和定标太阳光谱辐照度的光谱腔。总腔采用电替代测量方式,使用电加热功率复现光功率造成的温度升高,用可以精确测量的电功率代替光功率,实现绝对的功率测量。系统装配集成后,利用自建的 LabView 系统,进行了初步的测试工作。经过电加热测量,第一版总腔的时间常数为 33 s,总腔达到热平衡时间需要 7 ~ 8 min。考虑到电加热片阻值、铂电阻温度传感器阻值等随温度的变化,设计了空间低温绝对辐射计的总腔测量流程。

空间低温辐射计采用一次光加热和两次电加热模式进行光功率测量。开快门后进行光加热过程,经过一段热平衡时间后,放置在总腔上的铂电阻温度传感器输出平衡温度值(以电压形式输出 V_L)。之后关快门,开始电功率加热过程。第一次电加热测量中使用的估计电功率是由自测试和光加热过程测温电阻输出的平衡电压给出的。自测试过程是在系统降温完成后,热沉温度等控制在需求范围内,在总腔上加不同的电加热功率,考察不同加热功率下总腔测温电阻输出的平衡电压值,给出总腔的响应度,利用该响应度和光加热过程输出平衡电压,计算出关快门后第一次电加热所需电功率 P_1 。经一段平衡时间,测温电阻输出平衡电压 V_1 。此时的 V_1 并没有完全复现光加热输出的平衡电压 V_L 。考虑该差异经过修正后的电加热功率 P_2 加载在总腔上,平衡后输出的电压为 V_2 。那么产生 V_L 的平衡电压所需要的电加热功率 P_H 可以由两点插值给出:

$$P_H = \frac{P_1(V_2 - V_L) + P_2(V_L - V_1)}{V_2 - V_1}, \quad (1)$$

进入总腔的光功率 P_L 为:

$$P_L = \frac{1}{T} \left(\frac{NP_H}{A} + P_s \right), \quad (2)$$

其中, T 为窗口透过率, N 为光电不等效系数, A 为腔体吸收率, P_s 为被散射到吸收腔外的光功率,经过理论计算获得。

总腔经过上述流程后测量出光功率,设计光功率测量精度 0.02% 。与主光阑面积结合能够得到太阳总辐照度。

定标太阳光谱辐照度光谱腔由于响应度、时间常数等的限制,其热容不能太大,这就限制了腔体的体积和质量,不能采用电替代方式,腔体没有加热片。光谱腔利用其吸收光功率后的温度升高值与总腔进行定标。定标时,两腔通过

两块已知面积的光阑同时对太阳测量,光谱强输出平衡温度,总腔测量光功率,经过换算得到光谱腔吸收光功率,建立光谱腔吸收光功率与其温度升高值之间的关系,完成光谱腔定标。光谱腔定标完成后,即可测量单色太阳光的光谱功率与辐照度。

3.3 创新点

我们经过深入细致的指标论证及性能评价研究,提出了可行的 SCAR 研制方案。通过优化腔型几何尺寸以及选择内壁吸收黑材料,实现了具有超高吸收比斜底腔的设计,斜底腔吸收比高达 $0.999\ 928 \pm 0.000\ 005$ 。通过采用 OHFC 铜材料制作,改善了低温环境下吸收腔的热容和热导,使得总辐照度腔和光谱腔具有较短的时间常数。

4 总结与展望

中科院长春光机所正在研制空间低温绝对辐射计,其工作温度 20 K ,包含有测量太阳总辐照度的总腔和定标太阳光谱辐照度的光谱腔,能够实现 0.02% 精度水平的光功率测量,并且实现太阳光谱辐照度定标。该装置与作为实验室辐射基准的低温辐射计相比,功率测量精度水平相当,系统集成度高,增加光谱辐射定标功能,更适合作为空间辐射基准使用,为我国建立独立自主的在轨可溯源的遥感器辐射定标系统提供了重要保障。2020 年将通过改进、总装调试、热沉高精度温控、牵制光学系统配置以及加光测量和指标表征等工作,建成空间辐射基准仪器,并且为遥感器在高精度辐射定标服务。未来将以该仪器为核心,建立遥感器光谱辐射标准传递系统,并将其应用在航天领域,建成在轨直接溯源至国际单位制的定标系统,将遥感器辐射定标精度水平提高一个数量级,满足用户对遥感数据精度和溯源性的需求。

参 考 文 献:

- [1] XIONG X J, CAO C Y, CHANDER G. An overview of sensor calibration inter-comparison and applications [J]. *Front. Earth Sci. China*, 2010, 4(2): 237-252.
- [2] COOKSEY C, DATLA R. Workshop on bridging satellite climate data gaps [J]. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2011, 116(1): 505-516.
- [3] FOX N, KAISER-WEISS A, SCHMUTZ W, et al.. Accurate radiometry from space: an essential tool for climate studies [J]. *Philos. Trans. R. Soc. A*, 2011, 369(1953): 4028-4063.
- [4] SUTER M, FINSTERLE W, KOPP G. WRR to SI comparison with DARA [C]. *Proceedings of The WMO Technical*

Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observations Brussels Belgium, 2012.

- [5] FINSTERLE W. *International Pyrheliometer Comparison (IPC-XI) Final Report* [R]. Genève CH: World Meteorological Organization, 2011.
- [6] DINGUIRARD M, SLATER P N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1999, 68(3): 194-205.
- [7] GENTILE T R, HOUSTON J M, HARDIS J E *et al.*. National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(7): 1056-1068.
- [8] FOX N P, AIKEN J, BARNETT J J, *et al.*. Traceable radiometry underpinning terrestrial- and Helio-studies (TRUTHS) [C]. *Proceedings Volume 4881, Sensors, Systems and Next-Generation Satellites VI, Crete, Greece, 2003*, 4881: 395-406.
- [9] 方伟, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 太阳辐照绝对辐射计及其在航天器上的太阳辐照度测量 [J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(1): 23-28.
FANG W, YU B X, WANG Y P *et al.*. Solar irradiance absolute radiometers and solar irradiance measurement on spacecraft [J]. *Chin. J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(1): 23-28. (in Chinese)
- [10] 王玉鹏, 方伟, 弓成虎, 等. 双锥腔互补型绝对辐射计 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1662-1667.
WANG Y P, FANG W, GONG C H *et al.*. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1662-1667. (in Chinese)
- [11] 李在清, 吕正. 低温绝对辐射计的发展现状 [J]. *现代计量测试*, 1993(8): 13-17.
LI Z Q, LÜ Z. The present state of cryogenic absolute radiometer [J]. *Mod. Measur. Test*, 1993(8): 13-17.
- [12] FOX N P, HAYCOCKS P R, MARTIN J E *et al.*. A mechanically cooled portable cryogenic radiometer [J]. *Metrologia*, 1995, 32(6): 581-584.
- [13] HOUSTON J M, RICE J P. NIST reference cryogenic radiometer designed for versatile performance [J]. *Metrologia*, 2006, 43(2): S31-S35.
- [14] 杨东军, 方伟, 叶新, 等. 星载太阳辐射监测仪的太阳程控跟踪精度 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1813-1821.
YANG D J, FANG W, YE X, *et al.*. Program-controlled sun-tracking precision of spaceborne solar irradiance monitor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1813-1821. (in Chinese)
- [15] 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.
XIA Z W, WANG K, FANG W *et al.*. Applications and development of radiation calibration in orbit based on space monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1880-1891. (in Chinese)



吴铎(1992-),男,吉林长春人,博士研究生,研究实习员,2016年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事辐射计量等方面的研究。
E-mail: wuduo@ciomp.ac.cn



叶新(1979-),男,吉林省吉林市人,硕士,副研究员,2005年于中国科技大学获得硕士学位,主要从事辐射定标等方面的研究。
E-mail: newsyears@ustc.edu