

引用格式: DONG Huiwen, ZHANG Jiaping, LIAN Minlong, et al. Prepared of Ultrabroad Spectrum Calibration Blackbody Source for Deep Space Exploration[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0212003

董惠文, 张家平, 练敏隆, 等. 深空探测超宽光谱定标黑体源研制[J]. 光子学报, 2024, 53(2):0212003

# 深空探测超宽光谱定标黑体源研制

董惠文<sup>1</sup>, 张家平<sup>2</sup>, 练敏隆<sup>1</sup>, 肖大舟<sup>1</sup>, 王伟刚<sup>1</sup>, 鲁越晖<sup>3</sup>

(1 北京空间机电研究所, 北京 100094)

(2 宁波大学 物理科学与技术学院, 宁波 315211)

(3 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

**摘要:**针对深空探测超宽光谱定标黑体源的关键技术问题, 构建了一种基于优化微结构和纳米超黑涂层的深空探测星上黑体定标源。基于有限元方法仿真, 验证了微锥结构不同宽高比与黑体发射率间的对应关系, 确定了周期性线阵 V 槽结构相对于平面结构在黑体发射率方面的提升作用。优化星上黑体源高发射率微结构, 优选空间超黑高发射涂层, 设计星上黑体源高精度测温系统, 进而完成黑体源工程设计。最后, 通过星上黑体源发射率计量及实验室辐射定标稳定性测试进行验证。检测结果表明, 深空探测超宽光谱定标黑体源具有超宽光谱范围、高发射率、高温稳定性等特点, 其光谱范围为 5~50  $\mu\text{m}$ , 法向平均发射率为 0.986, 温度稳定性达到 0.16 K。该定标黑体源可大幅提升高发射率辐射定标源的光谱范围, 为深空探测载荷的在轨高精度星上辐射定标提供支撑。

**关键词:**深空探测; 定标; 超宽光谱; 高发射率; PID 控温; 高稳定性

中图分类号: TL81

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245302.0212003

## 0 引言

深空探测是针对月球以外的星体和行星, 基于光谱探测技术开展小天体的地质学或表面热物理参数研究, 用于探索宇宙起源、保护地球环境及避免重大灾难的重要技术。深空探测的关键技术之一是实现星上高精度辐射定标, 低温目标超宽光谱高精度辐射定标源的研制是深空探测载荷领域需要迫切解决的重大难题<sup>[1-2]</sup>。为实现对遥远目标星体表面的有效探测, 深空探测载荷需具备轻小结构、超宽波段、高分辨率<sup>[3-4]</sup>, 其中轻小构型便于降低载重, 携带更多的燃料和通信设备及其他有效载荷, 适应深空探测载荷长期的深空飞行活动<sup>[5]</sup>; 超宽光谱波段指载荷工作光谱需覆盖多种矿物和气体的特征吸收峰, 尽可能多地鉴别物质种类, 研究各类星体的矿物成分和大气组成等; 高分辨率指载荷具备高光谱分辨率, 由于深空探测对象的星体的矿物和气体等光谱成分复杂, 且同族矿物的光谱信息相似, 载荷的高光谱分辨率可有效提高物质鉴别精度。

深空探测小天体目标的辐射温度约在 100~420 K, 根据维恩位移定律, 结合阻挡杂质带 (Blocked Impurity Band, BIB) 红外探测器可响应较宽的谱段<sup>[6-8]</sup>。美国中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 采用标准灯、深空、星上黑体和太阳等定标方式, 光谱波段覆盖 0.4~14.4  $\mu\text{m}$ , 其红外辐射定标黑体源发射率可达 0.997, 工作温区为 270~315 K, 温度均匀性为 0.03~0.08 K<sup>[9]</sup>。美国陆地卫星 (Landsat) 的热红外通道采用了热红外探测器 (Thermal Infrared Sensor, TIRS), TIRS 的星上定标黑体, 光谱波段覆盖 10.8~12  $\mu\text{m}$ , 工作温区为 260~330 K, 温度控制精度为 0.1 K<sup>[10-12]</sup>。目前国内星载定标源对于可见光波段多采用定标灯和漫反射板定标, 红外波段多采用面源黑体定标, 其光谱一般可覆盖 1~16  $\mu\text{m}$ , 发射率普遍在 0.95 以上, 均匀性优于 0.4 K<sup>[13-15]</sup>。

本文构建深空探测载荷所需的 5~50  $\mu\text{m}$  超宽光谱高发射高稳定性辐射定标黑体源, 从深空探测用定标

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2021YFC2202000)

第一作者 (通讯作者): 董惠文, DHW508@163.com

收稿日期: 2023-06-27; 录用日期: 2023-09-19

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

黑体源设计指标入手,研究了深空探测用定标黑体源工作原理、定标黑体的发射率仿真与参数优化、黑体源的温控系统设计、定标黑体的综合参数测量方法等内容。

## 1 星上定标黑体源工作原理与技术指标

深空探测光谱仪在轨工作一般通过指向机构,需要在冷空背景(4 K)定标<sup>[16-17]</sup>、星上黑体源(288~308 K)辐射定标、小天体目标(100~420 K)成像之间实现深空探测不同任务信号的切换。黑体源定标的基本工作原理:将冷空背景信号、目标辐射能量和星上黑体源辐射定标信号分别引入光谱仪干涉光学系统,在输出端自动实现辐射定标与背景信号的光学相减,剔除背景辐射影响,完成光谱仪高精度星上辐射定标,从而实现光谱仪精确反演小天体矿物质成分与温度信息的深空探测任务。图1是深空探测光谱仪的定标原理示意图。

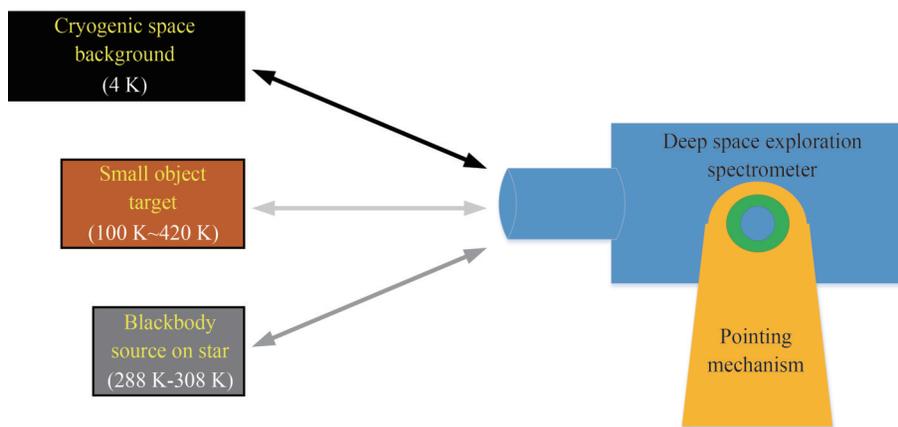


图1 深空探测光谱仪定标原理示意图

Fig. 1 Diagram of fundamental for spectrometer used in deep space

1) 研制的星上定标黑体源用于深空探测光谱仪星上定标,需要满足的主要技术指标为:1)工作温度为 $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ ;2)工作光谱范围为 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ ;3)深低温黑体尺寸 $\leq \Phi 20 \text{ mm}$ ;4)法向发射率 $\geq 0.98$ ;5)温度稳定性优于 $0.2 \text{ K}$ 。

本文星上定标黑体源工程设计,兼顾星载黑体重量、温度均匀性和工艺易加工要求,优选2A12铝合金材料作为星上定标黑体源基体。为实现星上定标黑体源高发射率性能,采用在基底加工微结构并喷涂超黑涂层的工艺提升方法。采用基于ADS124S08的铂电阻高精度测温装置温控设计实现星上定标黑体源高精度测温。最终,将星上定标黑体源放置于真空罐中,模拟在轨工作环境进行温度稳定性测量,来评价黑体源测温稳定性指标。星上黑体设计构型如图2。

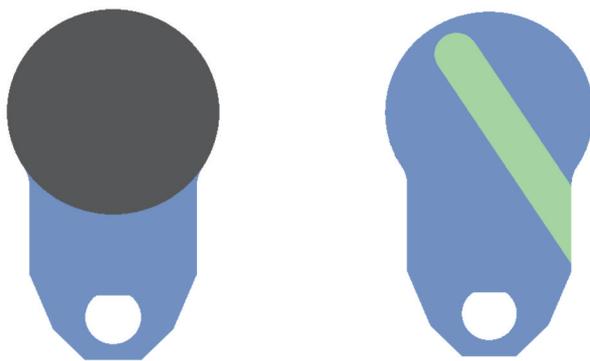


图2 星上定标黑体源设计构型

Fig.2 Design configuration diagram of calibration black body on star

## 2 定标黑体源表面微结构的参数设计优化与超黑涂层

目前,国内外星上定标黑体源常采用的微结构形式有线阵V形槽、金字塔微结构、同心圆V形槽等。黑体源微结构的使用,一方面能提升黑体源辐射面积,另一方面通过对V形槽的角度优化设计,可以进一步提升黑体源的发射率。工程实施中,除需考虑黑体源微结构形式的选择外,还需考虑黑体尺寸、形状以及加工工艺的易实现性。采用软件分析的方法对黑体源V形槽进行计算仿真。

### 2.1 微结构仿真方法验证

星上定标辐射源表面将制作微结构,为确定微结构与发射率间的相互关系需对其进行理论计算。采用基于有限元方法的COMSOL Multiphysics软件作为仿真工具。为确认计算仿真方法的正确性和结果的准确性,首先采用该方法对已发表的文献数据进行验证。

验证对象为SHINOZAKI K于2019年发表的论文数据,该文以微锥结构为研究对象<sup>[18]</sup>,微锥结构模型如图3所示,包括两部分域:倒三角沟槽和倒三角沟槽结构上方的空气域。将倒三角沟槽结构和空气域的两侧边界设置为周期性条件,将空气域上端设为端口1,入射光从端口1进入。将倒三角沟槽结构底部设为端口2,入射光从空气域经过倒三角沟槽后,从端口2射出。保证倒三角沟槽结构的底边长 $R$ 不变,改变深度 $L$ 。设置 $L/R$ 参数从0~10范围内变化,此处 $R$ 设定为 $20\ \mu\text{m}$ ,计算波长为 $30\ \mu\text{m}$ ,得到倒三角沟槽结构发射率变化趋势如图4所示。此处, $R$ 的设置由所关注的入射波长决定,当 $R$ 小于入射波长时不会出现衍射现象,可简化计算,节约计算资源。事实上,此处影响发射特性的主要是 $L/R$ 的比值,而 $R$ 的取值是相对灵活的。

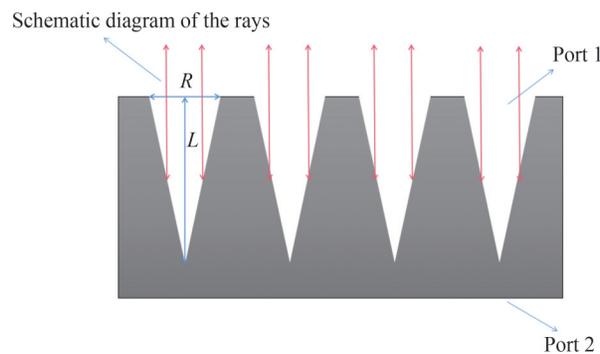


图3 用于仿真验证的微锥形状及几何参数示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 3 Diagram of micro-cone shape and its geometrical parameter characterization for simulation verification

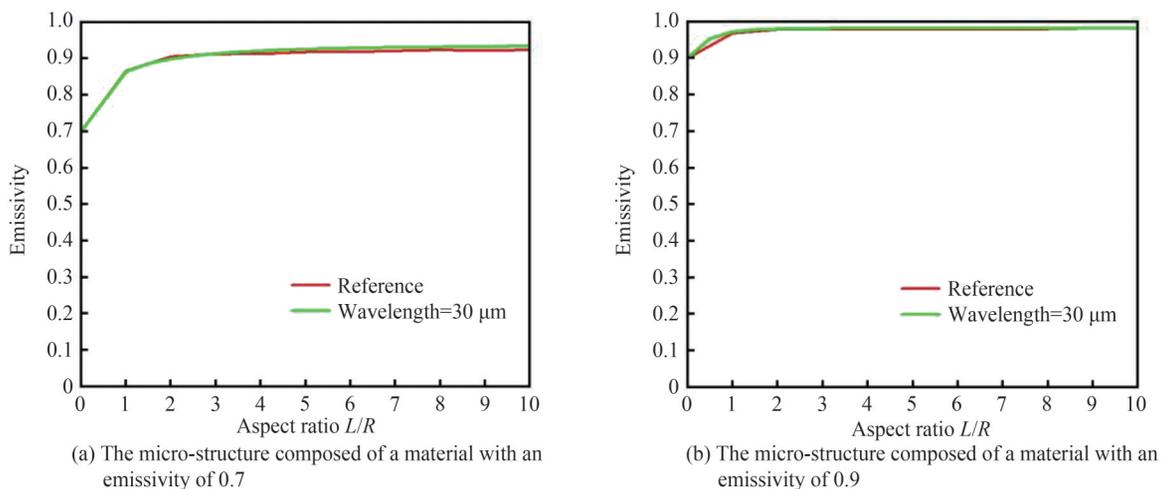


图4 发射率与微结构宽高比的关系

Fig. 4 Curves of emissivity spectra varying with the aspect ratio of micro-structure

图4为文献报道结果与仿真结果的对比。由图4(a)可见,当材料自身发射率为0.7时,即为 $L/R=0$ 的平面结构,随着 $L/R$ 值增大至2以上,发射率可提升至约0.90;由图4(b)可见,当采用自身发射率更高的材料,即当 $L/R=0$ 时发射率为0.9,随着 $L/R$ 值增大至2以上,发射率可提升至约0.98。图中仿真与参考文献数据曲线较为接近,相符程度很高,表明本文所采用的仿真计算方法准确可行。

## 2.2 微锥结构线阵V槽发射率模拟

受采用倒三角沟槽微结构提升发射率的启示,同时考虑采用铣削技术实现微结构的实验可行性,引入线阵V槽阵列结构至星上定标黑体对其发射率的影响。沿用2.1节中已验证的仿真方法,对图5所示结构进行发射率计算。首先线阵V槽锥尖角度取值 $30^\circ$ ,槽深1 mm,这对于铣削工艺而言较容易实现。然而,在具体仿真计算过程中发现当槽深为1 mm时,在 $5\sim 50\ \mu\text{m}$ 目标波长范围会出现大量的衍射极,导致无法利用波动光学理论进行计算。为了揭示其几何参数在目标波长中与发射率的关系,在保证锥尖角度不变的情况下,将V槽进行等比缩小。计算中参考了文献中石墨碳材料的光学常数<sup>[19]</sup>,其折射率和消光系数分别取值为 $n=3.07$ , $k=1$ 。首先计算 $R=21.43\ \mu\text{m}$ , $L=40\ \mu\text{m}$ 时的发射率光谱,如图6(a)所示;然后等比缩小V槽尺寸至 $R=10.71\ \mu\text{m}$ , $L=20\ \mu\text{m}$ ,发射率光谱如图6(b)所示。由此可见,当对 $R$ 和 $L$ 进行等比缩放并不明显影响其发射率,因此,为了避免计算中大量出现的衍射级,可以通过选择较为合适的几何参数组合来进行仿

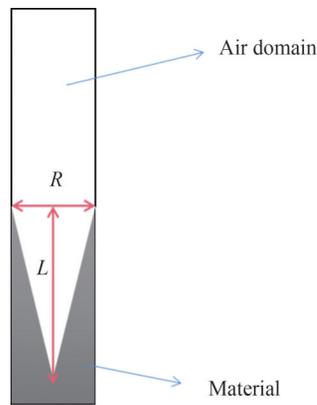


图5 线阵V槽二维平面结构示意图

Fig. 5 Diagram of linear array V-type trough structure

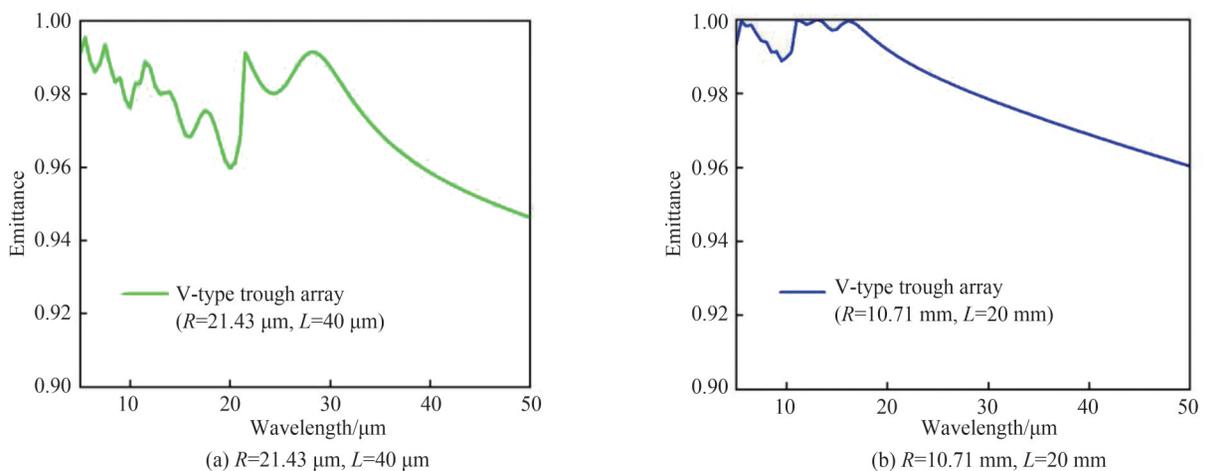


图6 线阵V槽发射率光谱模拟结果

Fig. 6 Simulation results of spectral emittance for linear array V-type trough

真。相对于无微结构的平面黑体而言,具有线阵V槽阵列的黑体显然具有更高的发射率,如图7所示,在5~50  $\mu\text{m}$  的整个波段范围内的提升均十分显著。此外,需要注意的是此处的平片为理想状态下具有完全物理平面的石墨碳涂层,而在实际制备过程中所形成的涂层极有可能存在一定孔隙或具有表面粗糙度,导致其对红外电磁波吸收的增加,从而获得比理想平片更高一些的发射率。

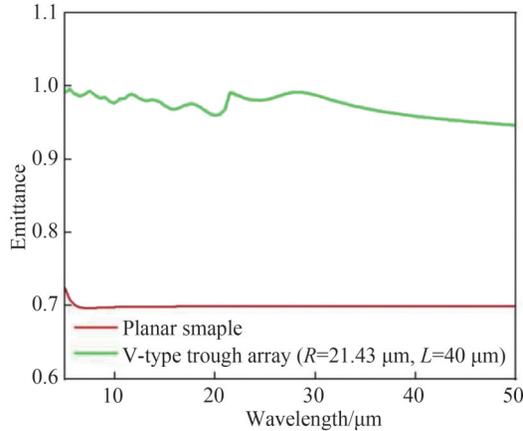


图7 平片与线阵V槽发射率对比模拟

Fig. 7 Comparison of the emissivity of the planar sample and the V-type trough array

### 2.3 定标黑体源微结构的吸光涂层技术

为满足宽波段范围高发射率要求,辐射黑体源表面加工最优角度的微结构,并对其喷涂超黑吸光材料,作为辐射体吸光材料。为避免辐射板上的超黑吸光材料在不同温差下从金属铝基体上脱落,需要做一系列试验验证吸光材料的粘稠性、固化时间、高低温冲击和涂覆在不同表面处理试件上的附着力,来确认铝材质黑体辐射板上涂覆方法和工艺。星上定标黑体的有效辐射面与安装底座设计为一体,使用螺钉固定在安装座,安装座与黑体之间设计隔热层。

选择超黑材料不但要考虑高吸收特性,还需要在耐高低温、长期物理特性不变和高导热性能等方面进行综合考虑。超黑涂层材料越黑,自身光吸收率越高,对应黑体发射率越高。国外代表产品有:英国的VANTABLACK、日本的Musou Black、以色列的ACKTAR,其发射率可达0.97~0.9996,但这些材料几乎完全限购,其制备技术为卡脖子技术。国内超黑材料的研制单位有:中国科学院宁波材料技术与工程研究所、中国科学院重庆绿色智能技术研究院、清华大学等,其发射率通常为0.91~0.99。星上辐射定标黑体源涂层的选用,除要求超黑材料具备高本征发射率性能外,还需满足在轨辐照环境验证,考虑工艺的可行性、稳定性、牢固性、清洗性、修补性、经济性、外观等综合因素。

## 3 定标黑体源的温控系统设计

### 3.1 测温与控温器件优选

黑体辐射光谱强度分布与黑体温度紧密相关,星上定标黑体的温度控制,可确保定标黑体源的工作温度和辐射正确的目标光谱强度。星上定标黑体源的黑体工作温度为 $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,黑体在轨存储温度为 $\pm 60^\circ\text{C}$ 。

为了确保以上温度条件,在黑体表面嵌入MF61系列薄膜负温度系数热敏电阻(Negative Temperature Coefficient, NTC),用于实时监测黑体表面的温度。热敏电阻在 $25^\circ\text{C}$ 的零功率电阻值为 $10 \times (1 \pm 1\%) \text{ k}\Omega$ ,负温度系数热敏电阻器的热敏常数B值为 $3950 \times (1 \pm 1\%) \text{ K}$ ,温度曲线如图8所示。

利用赛贝克效应研制的热电冷却器(Thermoelectric Cooler, TEC)来加热和制冷器件<sup>[18-20]</sup>。当加直流偏置电流在TEC两端时,TEC的一端加热,另一端制冷,发热端称为“热端”,制冷端称为“冷端”。如果把TEC两端的偏置电流反向,则热端与冷端互换。因此,可通过调节流过TEC两端电流的大小和方向来控制黑体表面的温度。

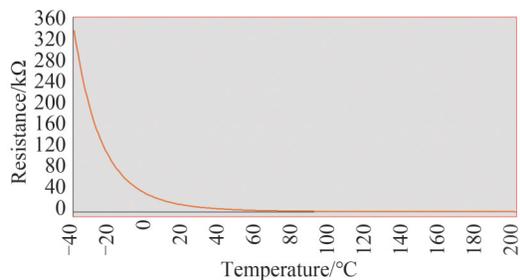


图8 MF61系列薄膜NTC热敏电阻温度曲线  
Fig. 8 Temperature curve of MF61 series film NTC thermistor

### 3.2 高精度温度装置设计

高精度温度测量装置可以准确有效地实时测量黑体表面的温度<sup>[20-24]</sup>。选用TI的高精度电压基准REF6225输出2.5 V基准电压,通过精密金属电阻限流为NTC输出100 μA的恒定电流,此时NTC在25 °C时电压为1 V。选用TI的24位精密数模转换芯片ADS124S08,采用四线电阻式温度检测器(Resistance Temperature Detector,RTD)进行温度测量,芯片可以最小分辨0.022 65 μV的电压,如图9所示。

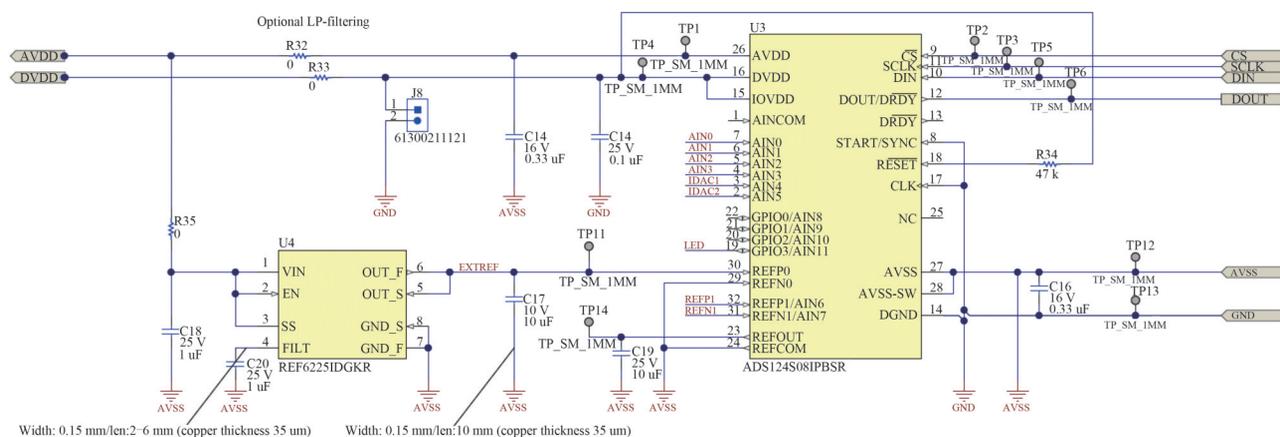


图9 高精度温度测量装置  
Fig. 9 High precision temperature measuring device

TEC驱动装置可以有效控制TEC,实现升温 and 降温的过程。选用TI的电源管理芯片TPS63020作控制器,能够拉取和灌入电流来驱动TEC,从而控制黑体表面的温度,图10所示为TEC驱动装置。

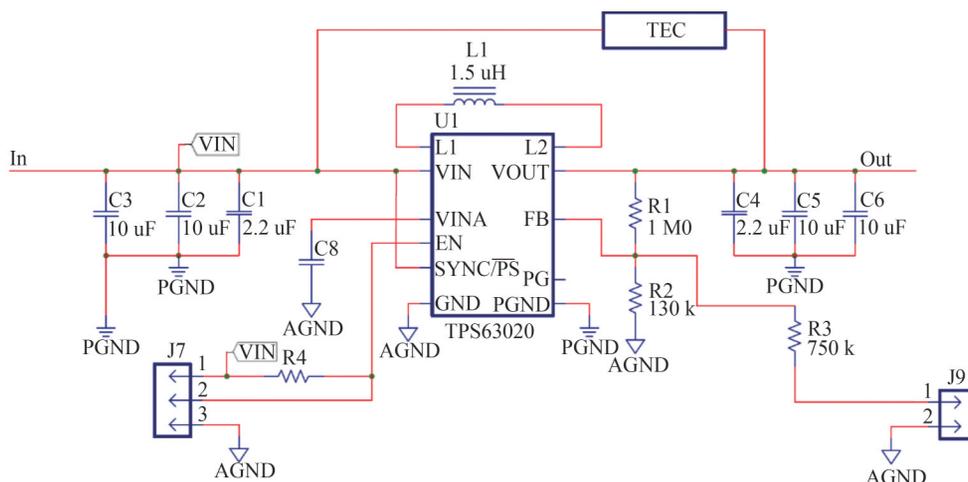


图10 TEC驱动装置  
Fig. 10 TEC drive device

### 3.3 深空探测黑体源温控系统设计

NTC和TEC贴在黑体表面,利用欧姆定律,通过恒流源给热敏电阻加电流,换算出电压值,反馈给高精度测温电路,测温电路通过与实际需求的温度进行对比分析,给TEC驱动电流发送控制指令,对TEC进行升温或者降温。图11为深空探测黑体控制系统框图。

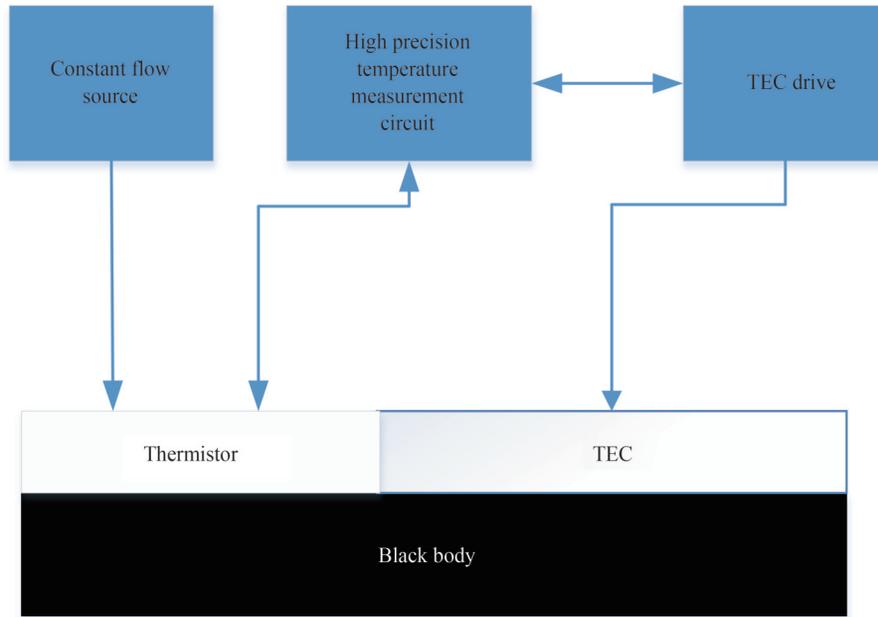


图11 深空探测黑体控制系统框图

Fig. 11 Block diagram of deep space exploration blackbody control system

## 4 定标黑体的综合参数测量方法

### 4.1 光谱发射率测量

为保证定标黑体源工程应用发射率的确定性,对其进行发射率计量,选用中国计量科学研究院建立的一套基于控制环境辐射的发射率测量装置<sup>[25-26]</sup>,其测量不确定度为0.29%( $k=2$ )。

基尔霍夫定律是在平衡状态下,物质的吸收率等于发射率,吸收能量等于发射能量,故辐射计在某一波段下探测到的辐射能量与黑体在该波段下总辐射能相等<sup>[27]</sup>。假设在该波段下黑体发射率为常数,可得到<sup>[26]</sup>

$$S(T) = e \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} B_{\lambda}(T_{bb}) d\lambda + (1 - e) \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I_{\lambda, bg} d\lambda \quad (1)$$

式中,  $T$  为辐射温度计温度值,单位为K;  $e$  为发射率;  $B_{\lambda}(T_{bb})$  为黑体在温度为  $T_{bb}$  时的辐射能;  $I_{\lambda, bg}$  为黑体反射环境辐射能。

使用 Sakuma-Hattori 方程计算的探测器输出为

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1} \quad (2)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为方程的定标系数,  $A$ 、 $B$  可由探测器的中心波长与探测器波长响应宽度计算得到,  $C$  待定,可通过定标结果拟合得出;  $c_2$  为第二辐射常数,其值为  $0.014\ 388\ \text{m}\cdot\text{K}$ 。假设响应幅度为1,可将  $S(T)$  视为辐射温度计接收到的辐射亮度。

由此可以得到黑体光谱发射率计算公式,通过定标数据采集及结果拟合便可得到黑体光谱发射率。测量发射率得到如图12的发射率光谱曲线。

由图12可知,在  $5\sim 50\ \mu\text{m}$  光谱区间,超黑涂层平均发射率为0.969 6,超黑微结构黑体源平均发射率为0.986 6。超黑微结构黑体源平均发射率比超黑涂层平均发射率提升0.017。

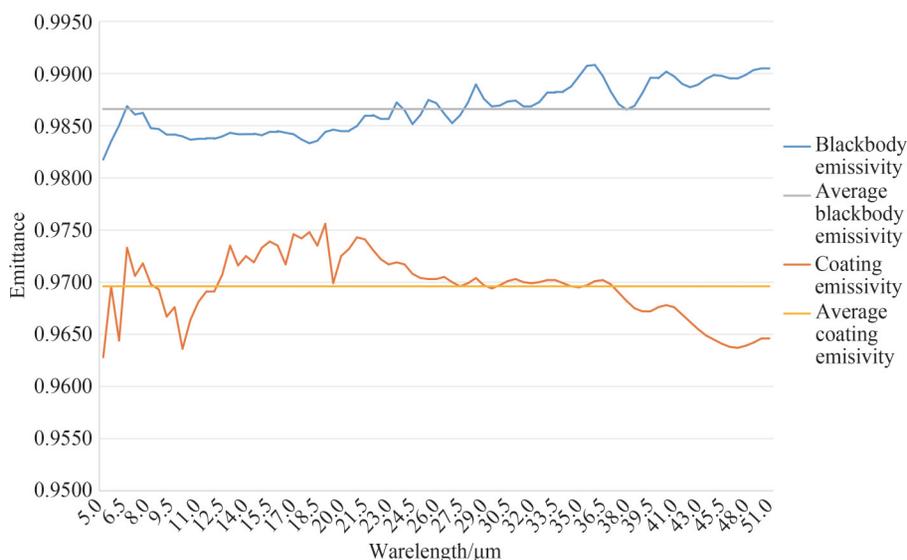


图12 光谱发射率测试曲线  
Fig. 12 Spectral emissivity test curve

#### 4.2 温度稳定性测量

高温度稳定性星上辐射定标黑体源可实现深空探测光谱仪高精度辐射定标<sup>[28-31]</sup>,因此定标黑体源的温度稳定性对于定标精度而言至关重要,对所制备的深低温黑体源进行温度控制系统验证实验。

定标黑体的环境边界条件为:地面实验室环境(常温常压)安装、地面低温真空环境测试(小于0.005 Pa)、在轨真空低温环境工作。定标黑体低温真空环境测试需满足功能要求,用于定标黑体控制电路通断测试。黑体工作温度为 $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,黑体在轨存储温度为 $\pm 60^\circ\text{C}$ 。为了保证温度的稳定性和准确性,将黑体基板放入真空灌中,温度保持时间为4 h。图13为深空探测黑体真空测试现场。

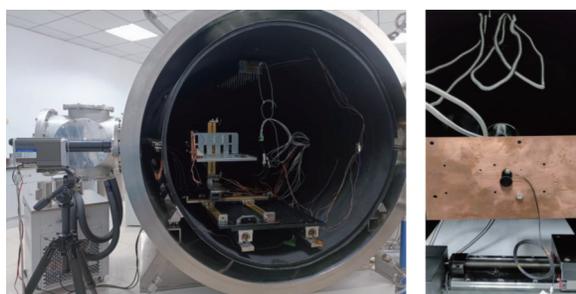


图13 深空探测黑体真空测试现场  
Fig.13 Blackbody vacuum test field of deep space exploration

温度控制系统采用四线RTD的温度测量。设置测试环境温度为 $10^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ ,理论上NTC的阻值依次为 $19.893\text{ k}\Omega$ 、 $15.739\text{ k}\Omega$ 、 $12.526\text{ k}\Omega$ 、 $10\text{ k}\Omega$ 、 $8.073\text{ k}\Omega$ 、 $6.537\text{ k}\Omega$ 。如表1。

表1 温度稳定性测量  
Table 1 Temperature stability measurement

No.	Environment temperature/ $^\circ\text{C}$	NTC resistance value/ $\text{k}\Omega$	Water sink temperature/ $^\circ\text{C}$
1	10	19.893	10.2
2	15	15.739	15.2
3	20	12.526	20.4
4	25	10	25.1
5	30	8.073	30.5
6	35	6.537	35.3

运行黑体测试系统,水槽温度依次设置为 10.2 °C、15.2 °C、20.4 °C、25.1 °C、30.5 °C、35.3 °C,对每个温度点,待系统温度稳定后读取黑体的温度数据,分别选随机取其中的 50 个数据记录,如图 14。

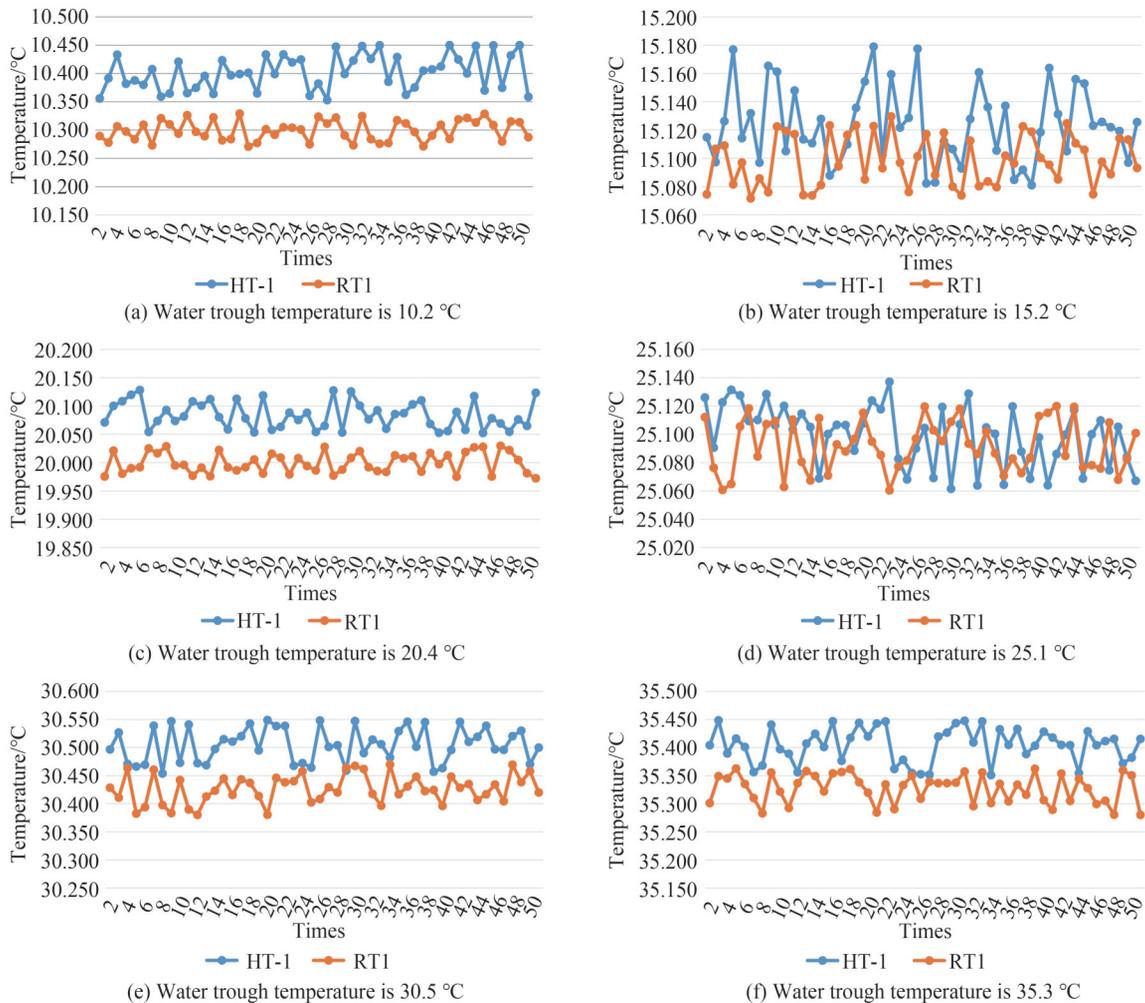


图 14 深空探测黑体温度点分析曲线

Fig.14 Blackbody temperature point analysis curve for deep space exploration

综上所述,本系统在 10~40 °C 温度范围内温度稳定性为 0.16 K。

## 5 星上辐射定标黑体源产品

深空探测光谱仪的星上辐射定标黑体源,采用优化微锥结构加喷涂超黑碳球复合材料涂层的设计优化及工艺优化方法提升其超宽光谱高发射率性能。超黑吸光材料主原材料为直径 5~30 nm 纳米碳球,通过表面修饰改性使其便于成膜。采用爆炸冲击法,利用瞬间高温高压环境及冲击波能量,使粒子加速运动,实现超黑纳米碳球的宏量制备。通过调控爆炸原料和工艺,将第二相原子或分子嵌入富勒烯笼内,形成改性后的超黑碳球复合材料。通过调整超黑材料成分及比率,在 5~50  $\mu\text{m}$  光谱区间,超黑涂层平均发射率为 0.969 6。将超黑涂层喷覆至优化的最优参数微锥结构表面,综合提升深空探测光谱仪的星上辐射定标黑体源宽谱段高发射率性能。最终,星上辐射定标黑体源平均发射率为 0.986 6,优于技术指标要求的法向发射率  $\geq 0.98$ 。通过测温与控温器件优选、高精度温度装置设计,及温控系统设计来提升深空探测黑体源温度稳定性,经真空装置温度稳定性测量验证,星上辐射定标黑体源温度稳定性为 0.16 K,优于技术指标要求的温度稳定性优于 0.2 K。星上辐射定标黑体源的测温元件、粘胶、基底材料及涂层材料通过空间辐照条件和在轨使用寿命条件验证,满足工程应用条件。图 15 为深空探测星上辐射定标黑体源产品。

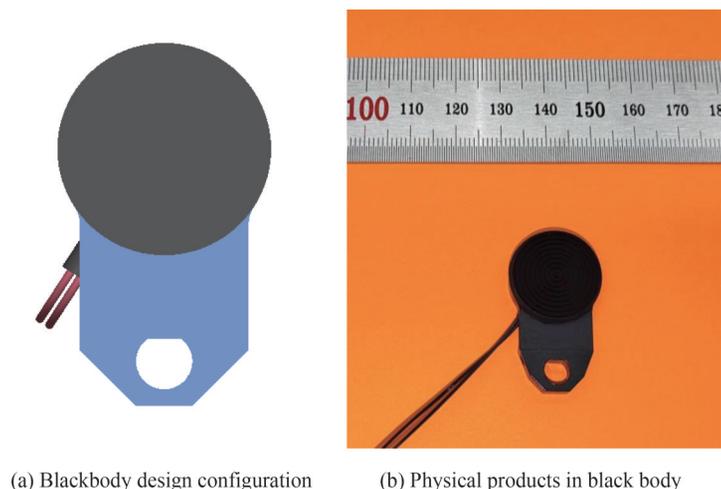


图 15 深空探测星上辐射定标黑体源  
Fig. 15 Radiometric calibration blackbody source on a deep space probe

## 6 结论

本文提出一种基于微结构和超黑涂层的宽波段、高发射率、高稳定性星上定标源,可实现深空探测载荷对小天体目标的观测。通过星上定标黑体源辐射面微结构优化分析,得到宽波段发射率设计最优参数,再优选碳基超黑涂层,进一步提升黑体源的光谱发射率;通过黑体源温控器件的优选及温控系统优化,得到黑体源高温稳定性系统。综合参数测量评定表明,定标黑体源指标合格,性能优良,满足工程使用条件,展现出宽光谱( $5\sim 50\ \mu\text{m}$ )、高发射率(0.986)、高稳定性(0.16 K)的特点,可为后续应用提供技术支撑。

### 参考文献

- [1] WANG Xiaoyong. Development and prospect of space optical technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(4):79-86.  
王小勇. 空间光学技术发展展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4):79-86.
- [2] ZHOU Feng, ZHENG Guoxian, SU Yun. Development of optical remote sensors of deep space exploration abroad and its enlightenment[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(1):16-22.  
周峰,郑国宪,苏云. 国外深空探测光学遥感载荷发展现状与启示[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(1):16-22.
- [3] TIAN Jun, ZHAO Haibin. The review of the YORP effect for asteroids[J]. Progress in Astronomy, 2021, 39(3):277-297.  
田君,赵海斌. 小行星 YORP 效应的观测研究现状[J]. 天文学进展, 2021, 39(3):277-297.
- [4] JIANG Haoxuan. Studies of thermophysical parameters and distribution CharaCteriStiCS of asteroid families based on infrared observations[D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2020.  
姜浩轩. 基于红外观测的小行星族群热物理参数与分布特征研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.
- [5] YANG Fuzhen. Optical design and prototype of compact VIS-IR imaging spectrometer for deep space exploration[D]. Suzhou: Soochow University, 2020.  
杨福臻. 深空探测紧凑型可见-红外成像光谱仪光学设计与原理样机[D]. 苏州:苏州大学, 2020.
- [6] MA Xingzhao, TANG Libin, ZHANG Yuping, et al. Research progress of silicon-based BIB infrared detector[J]. Infrared Technology, 2023, 45(1):1-14.  
马兴招,唐利斌,张玉平,等. 硅基 BIB 红外探测器研究进展[J]. 红外技术, 2023, 45(1):1-14.
- [7] PAN Changyi. Germanium-based blocked impurity band infrared detector and its photoelectric properties[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021.  
潘昌翊. 锗基阻挡杂质带红外探测器及其光电性质研究[D]. 上海:中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021.
- [8] LIAO Kaisheng, LIU Xihui, HUANG Liang, et al. Blocked impurity band infrared detector for astronomy[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2014, 44(4):360-367.  
廖开升,刘希辉,黄亮,等. 天文用阻挡杂质带红外探测器[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014, 44(4):360-367.
- [9] XIONG X, CHIANG K, ESPOSITO J, et al. MODIS on-orbit calibration and characterization [J]. Metrologia, 2003, 40(1):S89.
- [10] THOME K, LUNSFORD A, MONTANARO M, et al. Calibration plan for the thermal infrared sensor on the landsat data continuity mission [C]. SPIE, 2011: 804813-804819.

- [11] MONTANARO M, LUNSFORD A, TESFAYE Z, et al. Radiometric calibration methodology of the landsat 8 thermal infrared sensor [J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8803-8821.
- [12] BARSİ J, SCHOTT J, HOOK S, et al. Landsat -8 Thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration [J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11607-11626.
- [13] LIU Sha, WANG Zhantao, WANG Tao, et al. Research on a type of IR dynamic simulation drone based on extend blackbody[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(2):10-17.  
刘莎,王占涛,汪涛,等.一种基于面源黑体的某型红外动态模拟靶标研制[J].宇航计测技术,2017,37(2):10-17.
- [14] HU Youhua, HAO Xiaopeng, SIMA Ruiheng, et al. Development of large-aperture and high-emissivity surface blackbody radiation source[J].Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(3):314-320.  
扈又华,郝小鹏,司马瑞衡,等.大口径高发射率面型黑体辐射源的研制[J].计量学报,2021,42(3):314-320.
- [15] XIA Tianyuan, SHUAI Hongjin, QIU Yafeng. Design of infrared target system for outfield[J].Journal of Applied Optics, 2020, 41(5):1067-1073.  
夏天元,帅宏进,邱亚峰.外场使用红外靶标系统的设计[J].应用光学,2020,41(5):1067-1073.
- [16] SHENG Yicheng, DUN Xiong, JIN Weiqi, et al. Review of on-orbit radiometric calibration technology used in infrared remote sensors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(9):18-30.  
盛一成,顿雄,金伟其,等.星上红外遥感相机的辐射定标技术发展综述[J].红外与激光工程,2019,48(9):18-30.
- [17] JIN Libing, LI Xiaoman, LIAN Minlong, et al. Analysis of the in-orbit radiation calibration of SWIR remote sensing system combined with blackbody and star[J].Infrared Technology, 2023, 45(2):123-128.  
晋利兵,李晓曼,练敏隆,等.黑体与恒星相结合的短波红外传感器在轨辐射定标简析[J].红外技术,2023,45(2):123-128.
- [18] SHINOZAKI K, NISHIKAWA I, TANAKA K, et al. Cryogenic radiator with cavity-in-cavity structure for space missions[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, 502(1): 012070.
- [19] GHOSH G. Handbook of optical constants of solids[M]. Academic Press, 1998.
- [20] ZHANG Xiaopeng, GUO Jingwei. Uncooled infrared focal plane temperature control system based on ADN8830 [J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(1):1-4.  
张晓鹏,郭经纬.基于ADN8830的非制冷红外焦平面温度控制系统[J].光电技术应用,2011,26(1):1-4.
- [21] FU Zhihong. A method of observing and controlling temperature of the black-body calibration device in infrared radiation camera [J]. Space Electronic Technology, 2016, 13(3):76-80.  
付智红.一种用于星上半导体制冷器的温度控制方法[J].空间电子技术,2016,13(3):76-80.
- [22] LIU Lifei, LV Weixing, WU Chao, et al. Constant temperature control system based on TEC and PID [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(2):137-144.  
刘丽飞,吕卫星,武超,等.基于TEC和PID的恒温控制系统[J].计算机测量与控制,2022,30(2):137-144.
- [23] REN Qigan, TAN Qinrong. Design of temperature control system for uncooled focal plane detector based on ADN8830 [J].Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(12):1718-1721.  
任其干,谭钦红.基于ADN8830的非制冷焦平面探测器温度控制系统设计[J].传感技术学报,2010,23(12):1718-1721.
- [24] JIA Chengan, YE Lin, GE Junfeng, et al. A digital PID temperature control system based on STM32 and ADS1248[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(11):103-105.  
贾诚安,叶林,葛俊锋,等.一种基于STM32和ADS1248的数PID温度控制系统[J].传感器与微系统,2015,34(11):103-105.
- [25] HAO Xiaopeng, SONG Jian, SUN Jianping, et al. Vacuum radiance temperature national standard facility for infrared remote sensors of Chinese Fenyun meteorological satellites[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7):1845-1851.  
郝小鹏,宋健,孙建平,等.风云卫星的红外遥感亮度温度国家计量标准装置[J].光学精密工程,2015,23(7):1845-1851.
- [26] SONG Jian, HAO Xiaopeng, YUAN Zundong, et al. Blackbody source emissivity measurement method based on controlling surroundings radiation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9):269-275.  
宋健,郝小鹏,原遵东,等.基于控制环境辐射的黑体辐射源发射率测量方法研究[J].中国激光,2015,42(9):269-275.
- [27] SONG Jian. Study of measurement principle and key technology of on-orbit calibration in situ blackbody [D]. Beijing: National Institute of Metrology, China, 2015.  
宋健.星载自校准黑体辐射源测量原理和关键技术研究[D].北京:中国计量科学研究院,2015.
- [28] LU Jin. Research of scene-based infrared image non-uniformity correction algorithm [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.  
卢金.基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [29] ZHONG Ying. Research on non-uniformity correction algorithms for IRFPA [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.  
钟莺.红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究[D].南京:南京理工大学,2016.
- [30] TIAN Qijie, CHANG Songtao, QIAO Yanfeng, et al. Radiometric calibration based on low-temperature area blackbody

for infrared systems with high dynamic range[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0412003.

田棋杰,常松涛,乔彦峰,等. 采用低温面源黑体实现红外系统宽动态范围定标[J]. *光子学报*, 2017, 46(4): 0412003.

[31] HOU Liangke. Research on nonuniformity correction algorithm for infrared[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.

侯良科. 红外探测器非均匀校正算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.

## Prepared of Ultrabroad Spectrum Calibration Blackbody Source for Deep Space Exploration

DONG Huiwen<sup>1</sup>, ZHANG Jiaping<sup>2</sup>, LIAN Minlong<sup>1</sup>, XIAO Dazhou<sup>1</sup>,  
WANG Weigang<sup>1</sup>, LU Yuehui<sup>3</sup>

(1 *Beijing Institute of Space Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100094, China*)

(2 *School of Physical Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

(3 *Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China*)

**Abstract:** For small objects in deep space exploration, the radiation temperature is about 100 K to 420 K. According to Wien's displacement law, deep space exploration targets cover the ultra-wide spectral range of 5  $\mu\text{m}$  to 50  $\mu\text{m}$ , and high-precision on-board calibration is the key to the accurate detection of deep space exploration loads. Therefore, it is necessary to develop an on-board calibration source with high emissivity and high temperature stability of ultra-wide spectrum. Aiming at the technical problems of detecting ultra-wide spectrum, high reflectivity and high temperature stability of radiometric calibration blackbody source on ultra-wide spectrum stars in deep space, this paper carries out in-depth research and experimental verification from several aspects such as simulation, key component design and sample detection methods, so as to ensure the engineering realization and application of high-index precision radiometric calibration blackbody source on stars. COMSOL Multiphysics software simulation based on finite element method, microstructure design of blackbody source, emittance detection method of blackbody source and radiation calibration test in laboratory were studied. Firstly, starting from the parameter optimization design of the blackbody surface microstructure, the means of improving the emissivity is transformed from qualitative research to quantitative calculation. The optimal design parameters for wide-spectrum emissivity design are obtained by optimizing the microstructure of the radiating surface of the on-board calibration blackbody source, and then carbon-based ultra-black coating material is selected to further improve the spectral emissivity of the blackbody source. The microstructure optimization junction and the superblack coating of the blackbody source on the star are optimized to increase the emissivity of the blackbody source on the star from 5  $\mu\text{m}$  to 50  $\mu\text{m}$  in the spectral range to 0.986, in which the ultra-wide spectrum is realized. Depending on the superblack coating, each material has different intrinsic radiation ability in different bands, and the coating is a composite porous structure, which makes it have high emission ability in a wide band. Secondly, by careful selection of blackbody source temperature controller and optimal design of temperature control system, the temperature measurement accuracy and stability of on-board calibration source are improved. The MF61 series film NTC thermistor is embedded on the blackbody surface to monitor the temperature of the blackbody surface in real time. The Thermoelectric Cooler (TEC) is a heating and cooling device that has been developed utilizing the Seebeck effect; The high-precision temperature measuring device is capable of accurately and effectively measuring the real-time surface temperature of a blackbody. It utilizes the high-precision voltage reference REF6225 and precision metal resistance current limiting to provide constant current output for NTC as a constant current source, while employing the precision digital-to-analog conversion chip ADS124S08 and four-wire resistance temperature detector for temperature measurement. Using Ohm's law, the voltage value is converted and fed back to the high precision temperature measurement circuit. The temperature measuring circuit sends control instructions to TEC drive current through comparison and analysis with the actual required temperature. The power management chip TPS63020 is used as controller, which can pull and inject current to drive TEC, and then heats up or cool down TEC to control the blackbody surface temperature. The temperature stability of the on-board calibration blackbody source reaches 0.16 K. Finally, the design

and process reliability of the blackbody source are tested by comprehensive parameter measurement and evaluation. The design results are verified by measuring the emissivity of the blackbody source and the temperature stability of the blackbody source in the vacuum environment. The test results show that the spectral range of ultra-wide spectral calibration blackbody source for deep space detection is 5  $\mu\text{m}$  to 50  $\mu\text{m}$ , the normal average emissivity is 0.986, and the temperature stability reaches 0.16 K. The blackbody source will greatly improve the spectral range of high-emissivity radiometric calibration sources, and provide basic support for on-orbit high-precision radiometric calibration of deep space exploration loads.

**Key words:** Deep space exploration; Calibration; Ultrawide spectrum; High emissivity; PID temperature control; High stability

**OCIS Codes:** 120.5630; 120.6085; 120.6200