

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.08

深低温星上定标黑体源研究

董惠文¹, 练敏隆¹, 马思宇¹, 李洋¹, 裴景洋¹, 于志¹, 凤晓华²

(1.北京空间机电研究所, 北京 100094; 2.中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘要: 为匹配红外空间载荷低温光学镜头的光学性能, 降低背景噪声, 实现载荷高精度星上定标, 研制了一种基于制冷机主动制冷的深低温星上定标黑体源装置(低温 100 K 工作), 该星载黑体源装置由面黑体辐射体、低温制冷机主动制冷系统、冷量传输热管及精密测控温系统组成, 通过载荷级真空辐射定标实验校验, 最终实现红外遥感器对星上定标黑体源宽光谱(2 ~ 16 μm)、高发射率(0.987)、深低温(100 K)的高精度定标源需求。该深低温星上定标黑体源可用于对极远极冷极弱目标探测的红外载荷星上辐射定标, 其高精度、低功耗、通用性的工程化设计方法, 为后续相关研究及推广提供技术支撑。

关键词: 深低温; 星上定标黑体; 真空辐射定标

中图分类号: TB94

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2023) 06-0067-09

Development of deep cryogenic onboard calibration blackbody source

DONG Huiwen¹, LIAN Minlong¹, MA Siyu¹, LI Yang¹, PEI Jingyang¹, YU Zhi¹, FENG Xiaohua²

(1.Beijing Institute of Space Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100094, China;

2.Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: In order to match the optical performance of low-temperature optical lenses of infrared space payloads, reduce background noise, and achieve high-precision on-board calibration of payloads, a deep-low temperature on-board calibration blackbody source device based on active refrigeration (operating at a low temperature of 100 K) was proposed. The spaceborne blackbody source device is composed of a face-blackbody radiator, an active refrigeration system of a low temperature chiller, a heat pipe of cooling capacity transmission, and a precise temperature measurement and control system. It was verified through vacuum radiation calibration experiment that the requirements of infrared remote sensors for the on-board calibration blackbody source: wide spectrum (2 ~ 16 μm), high emissivity (0.987) and deep low temperature (100 K) were achieved. The blackbody source for calibration on a cryogenic satellite can be used for on-board radiation calibration of infrared payloads for the detection of extremely distant, extremely cold and weak targets. The high precision, low power consumption and universal engineering design method of the calibration source provides technical support for subsequent related research and promotion.

Key words: deep cryogenic temperature; onboard calibration blackbody source; vacuum radiation calibration

0 引言

红外光学遥感载荷可应用于实现资源普查、

环境监测、海洋观测、气象分析、深空探测、空间引力波探测、天文观测等领域。红外遥感载荷中的红外半导体材料具有禁带宽度窄、红外光量

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-09-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFC2200201)

引用格式: 董惠文, 练敏隆, 马思宇, 等. 深低温星上定标黑体源研究[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 67-75.

Citation: DONG H W, LIAN M L, MA S Y, et al. Development of deep cryogenic onboard calibration blackbody source[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 67-75.



子能量小等特点,且在较高温度下会产生固有热激发,导致大的暗电流和噪声。为抑制红外空间载荷的背景噪声并提高其光学探测性能,常采用低温光学镜头进行噪声抑制。为保证载荷实现高精度测量,需利用深低温星上定标黑体源,实现载荷的星上定标^[1-2]。

美国中分辨力成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)光谱波段覆盖 $0.4 \sim 14.4 \mu\text{m}$,其红外辐射定标源采用全孔径V形槽平板面黑体,发射率可达0.997,工作温区 $270 \sim 315 \text{ K}$,温度均匀性为 $0.03 \sim 0.08 \text{ K}^{[3-4]}$,美国陆地卫星采用了热红外探测器(Thermal Infrared Sensor, TIRS),TIRS的星上红外辐射定标源采用全孔径V形槽平板曲面星上黑体,光谱波段覆盖 $10.8 \sim 12 \mu\text{m}$,工作温区 $260 \sim 330 \text{ K}$,温度控制不确定度不超过 $0.1 \text{ K}^{[5-6]}$ 。

国内星上定标面黑体源有较简单的技术工艺、较轻的重量,其工程实施性及应用性更强^[7-9]。我国星上辐射定标黑体的成功应用有:高分四号、高分五号、海洋卫星等^[10-13]。据相关文献可知,国内面黑体的发射率为 $0.95 \sim 0.99$,温度均匀性优于 $0.3 \text{ K}^{[7-13]}$ 。

目前,国内外星上辐射定标黑体的研究多集中在常温区和中高温区,亟需进行深低温星上定标黑体的研究。本研究提出一种基于制冷机主动制冷的深低温星上辐射定标面黑体装置(低温 100 K 工作),扩展了目前星上辐射定标面黑体的工作温

区。从深低温星上辐射定标黑体源设计指标入手,通过面黑体源光机模型设计、面黑体源宽谱段发射率设计及测试、星上面黑体源的热学分析及验证、面黑体源的载荷系统级辐射定标实验,最终实现星上定标黑体源宽光谱、高发射率、深低温的技术性能,满足对极远极冷极弱目标探测的红外遥感器高精度定标需求。

1 深低温黑体结构设计及关键指标

深低温星上定标黑体的定标原理为:黑体定标切换机构,实现定标位与“0”位的切换,当黑体定标切换机构将黑体切入光路后(处于定标位),红外载荷可实现定标功能;当黑体定标切换机构将黑体切出光路后(处于“0”位),红外载荷可对目标成像。深低温黑体组件设计构型如图1所示,深低温星上定标黑体的关键指标见表1。

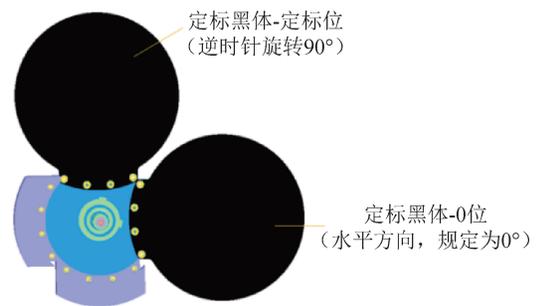


图1 深低温黑体设计构型图

Fig.1 Configuration diagram of deep low temperature blackbody design

表1 深低温星上定标黑体的关键指标表

Tab.1 Key indexes of deep cryogenic on-board calibration blackbody

材料	黑体冷屏温度/K	黑体温度点/K	温度均匀性/K	测温误差/K	控温误差/K	发射率	外形直径/mm
铝合金 5A06	90 ~ 100	100 ~ 120	$\leq \pm 0.2$	$\leq \pm 0.1$	$\leq \pm 0.15$	≥ 0.98	$\Phi 200$

2 深低温星上黑体设计优化及实现

2.1 黑体宽谱段高发射率研究

定标黑体高发射率的实现依赖于黑体辐射体微结构的形式及超黑涂层材料。常见的辐射面的微结构形式有:V形槽、金字塔、同心圆等,微结构尺寸在mm级。文献[14]利用Monte Carlo方法研究V型槽角度对法向发射率的影响情况。文献[7]利用基于Monte Carlo法的发射率计算软件STEEP3,

计算了V槽不同角度的法向发射率。

从工艺实现的角度出发,对深低温定标黑体辐射面采用线切割法加工V形槽,再采用热喷涂工艺在V槽表面沉积超黑涂层。合理的V形槽微结构不仅可以增加辐射面积,还可以提升发射率。本文采用优化设计的 31° V形槽设计,槽深约 1 mm ,深低温定标黑体实物如图2所示。

深低温黑体辐射面采用了宁波材料所研制的碳基高发射超黑涂层材料^[15],该碳基超黑涂层的



图2 深低温定标黑体实物

Fig.2 Deep low temperature calibration blackbody

主原材料为5~30 nm纳米碳球,通过表面修饰改性而便于成膜化。采用爆炸冲击方法,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。同时,通过调控爆轰原料和工艺,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,其涂层的本征发射率可达0.962。采用六自由度运动机械臂进行超黑热喷涂工艺,确保超黑涂层热喷涂的均匀性和稳定性。超黑纳米碳球涂层微观如图3所示。

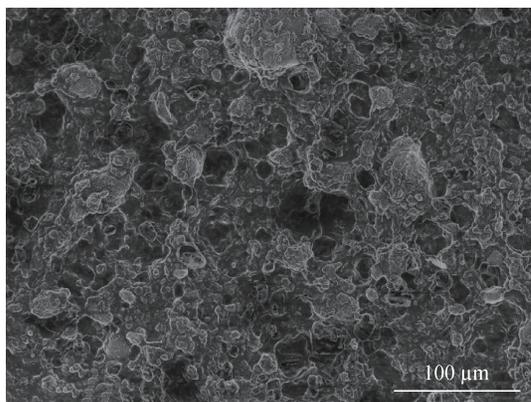


图3 电子力显微镜下超黑纳米碳球涂层微观图

Fig.3 Microstructure of the ultra-black nano carbon ball coating under electron force microscopy

2.2 深低温黑体热学分析及实现

热的传播有三种基本方式:导热方式、对流方式和辐射方式^[16-19]。利用 Thermal Desktop 软件进行热仿真分析,对热分析模型做以下假设:①定标机构与透镜组件安装接口位置为直接接触,接触面积为2000 mm²,低温镜头设置90 K定温边

界;②定标机构与红外载荷底板之间需要增强隔热,安装支架按照目前的结构模型设计,材料为玻璃钢,红外载荷底板和周围环境按照293 K定温边界设置;③深低温黑体不工作时,深低温黑体放置于黑体冷屏内,减少受外热流的影响,黑体冷屏需包覆多层,减少向外界的漏热;④制冷机通过机械做功产生冷量,由制冷机引出一对多冷链传热,分别对低温镜头和黑体外壳制冷,制冷机自身机械做功所产生的热量需通过热管以及连接的散热面进行散热,设定冷链末端温度为80~86 K,冷量需求3 W;⑤黑体与黑体转盘之间通过4个螺钉按照接触方式安装,每个螺钉处安装接触面积为35 mm²。深低温星上定标黑体热仿真分析模型如图4所示。

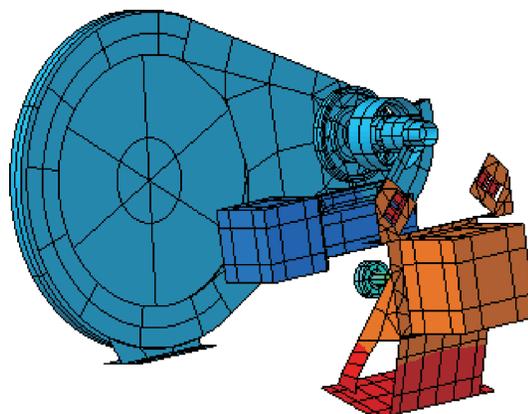


图4 深低温黑体热分析网格图

Fig.4 Deep low temperature blackbody thermal analysis grid diagram

按照以上设置,计算在不加热和加热控温于120 K的情况下,3、5、8 mm厚度黑体的温度情况。不同工况深低温黑体均匀性分析云图如图5所示,不同工况深低温黑体温度变化曲线如图6所示。

对比分析图5的(a)、(b)、(c)和图6的(a)、(b)、(c)可知:在不控温状态下,3、5、8 mm厚度的黑体,温度水平约为108 K,随着黑体厚度减小,温度梯度增加,3 mm时温度梯度为0.07 K,5 mm时温度梯度为0.05 K,8 mm时温度梯度为0.04 K,但三款黑体温度波动均无法控制。对比分析图5的(d)、(e)、(f)和图6的(d)、(e)、(f)可知:在控温120 K,加热功率30 W条件下,随着黑体厚度减小,加热到温时间缩短,8 mm加热到温时间最长,为450 s;温度梯度和波动随着黑体厚度减小而增

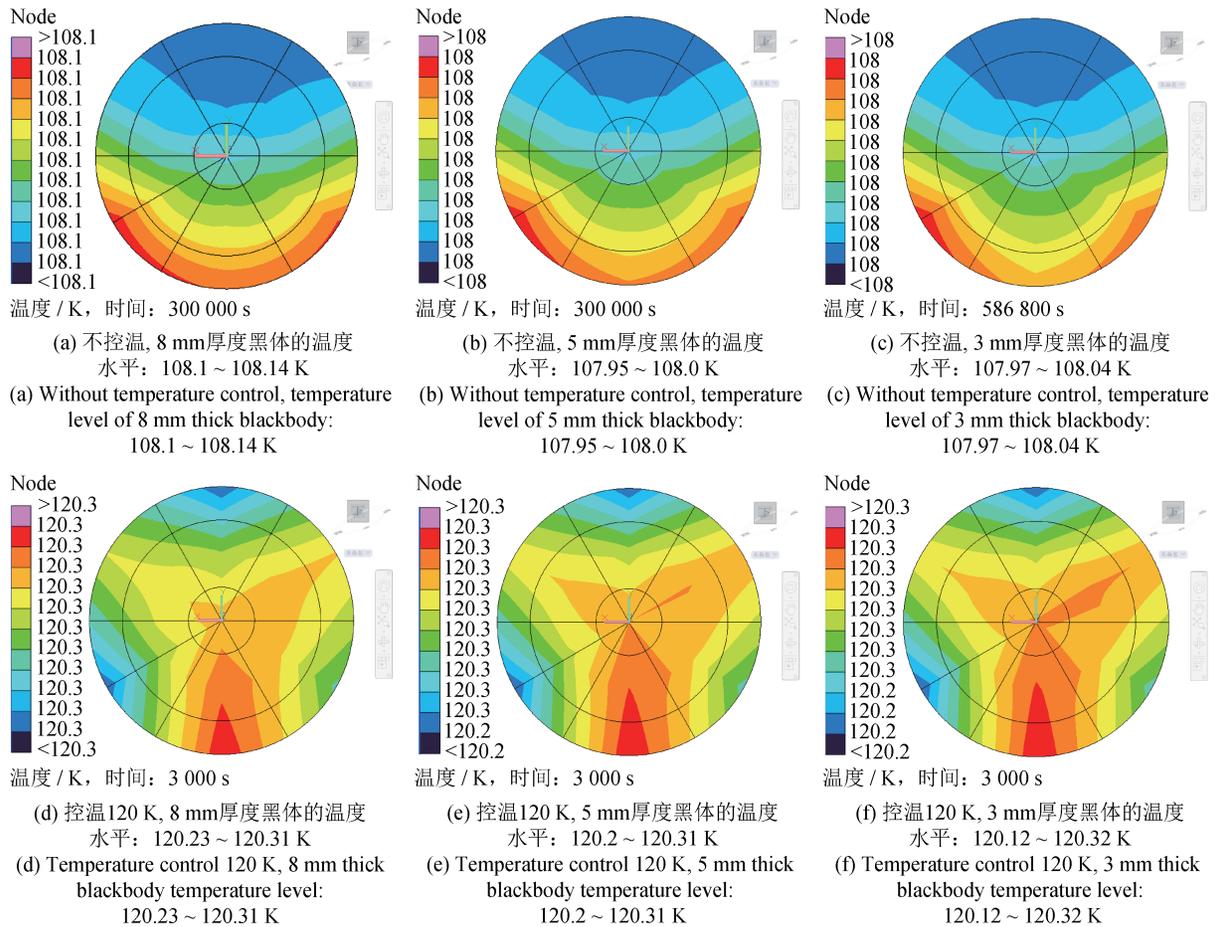


图5 深低温黑体均匀性分析云图

Fig.5 Deep low temperature blackbody uniformity analysis cloud image

大, 3、5、8 mm厚黑体温度梯度分别为0.2、0.1、0.08 K, 波动分别为0.08、0.05、0.03 K。均满足温度均匀性优于 ± 0.2 K指标要求, 考虑到深低温黑体工程研制的质量控制及综合性能, 最终黑体源厚度选用5 mm。

为使深低温黑体能快速、稳定地处于90~100 K工作温区, 选用一款12 W / 100 K脉冲管制冷机搭配冷链的方式为其制冷, 搭配制冷控制器可实现快速降温、快速变温、稳定的恒温功能。此款制冷机具有体积小、重量轻、降温速度快、温度稳定性较高、微振低等优点, 具体指标见表2。

采用冷链的方式^[2]将制冷机的冷量传递给黑体

冷屏, 柔性冷链能够更加灵活地分配冷量、隔绝振动, 释放耦合应力^[20]。黑体冷屏表面贴有加热片, 用于保持黑体冷屏温度为90~100 K。深低温黑体在不定标时处在黑体冷屏90~100 K中, 通过辐射制冷方式让深低温黑体降温。在黑体背侧布置加热回路, 外侧包覆20个单元的双面镀铝聚酯膜多层, 黑体位于冷屏内侧, 冷屏内表面需发黑处理。定标时黑体加热至定标温度点后切入光路, 定标完成后黑体转入冷屏内侧, 通过发黑面向冷屏辐射散热。通过黑体背侧布置的加热回路, 对深低温黑体温度进行动态实时调整, 使得深低温黑体温度处于100~120 K, 用于镜头定标。在黑

表2 制冷机性能指标

Tab.2 Performance index of chiller

制冷机压缩机尺寸	制冷机冷指尺寸/mm	制冷机质量/kg	制冷量/W @ 100 K	制冷温度 / K	降温时间 / min	冷板温度稳定性/(K·30 min ⁻¹)	微振动输出总均方根/N
≤ Φ 95 mm × 184 mm	≤ Φ 22	≤ 3.5	≥ 12	100 ± 1	≤ 15	≤ 0.1	< 5

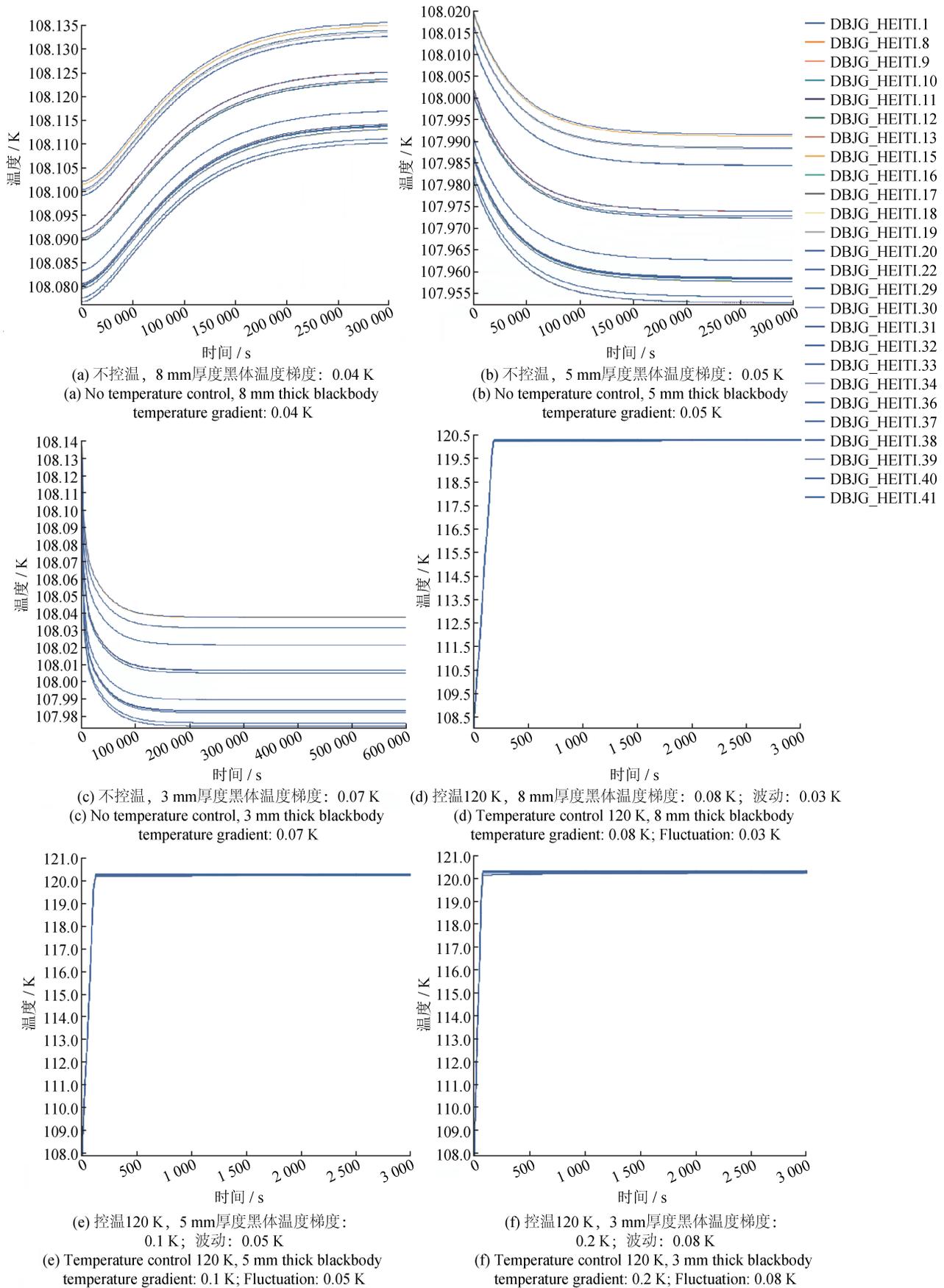


图6 深低温黑体温度变化曲线图

Fig.6 Deep low temperature blackbody temperature change curve

体内部嵌套安装有测温铂电阻,用于深低温黑体辐射定标时的控温和测温。

3 深低温星上黑体性能测试

3.1 深低温黑体发射率测量

绝对黑体的发射率恒等于1,实际物体的发射率与辐射方向以及波长密切相关。根据发射率随波长变化及随辐射方向变化的关系,可得到以下四种发射率类型:半球光谱发射率、定向光谱有效发射率、半球全波长发射率、定向全波长有效发射率。文中研究半球光谱发射率。

半球光谱发射率测量原理为:假设物体材料为不透射灰体,即入射能等于反射能与吸收能之和,则在入射能确定的情况下,通过测量物体反射率来获得物体吸收率,根据基尔霍夫定律,假设灰体的发射率和吸收率相等,得到物体发射率 $\varepsilon(\lambda) = 1 - R(\lambda)$,其中 $R(\lambda)$ 为物体在红外波段全反射率^[21]。

$$\varepsilon(T_1) = \frac{\int_2^{16} I_b(\lambda, T_1)(1 - R_1(\lambda, T_1)/R_0(\lambda, T_0))d\lambda}{\int_2^{16} I_b(\lambda, T_1)d\lambda} \quad (1)$$

式中: λ 为波长, T_1 为测试温度, T_0 为室温, $\varepsilon(T_1)$ 为样品 T_1 下发射率, $R_1(\lambda, T_1)$ 为样品在 T_1 温度条件下的反射率曲线, $R_0(\lambda, T_0)$ 为参考样品(如镀金标准片)在 T_0 温度条件下的反射率曲线。

中国计量院测量得出^[22]: 常温环境下深低温黑体辐射面在波长 2 ~ 16 μm , 平均发射率为 0.987, 发射率测量不确定度 $U_{99} = 0.025$, $k = 2$ 。图7为深低温黑体发射率测量曲线图。

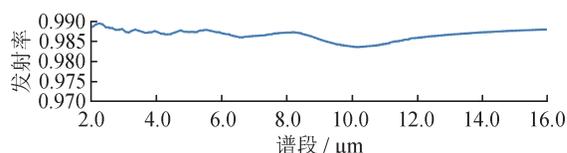


图7 深低温黑体发射率测量曲线图

Fig.7 Deep low temperature blackbody emissivity measurement curve

3.2 深低温黑体实验室辐射定标

在卫星发射前,需对星载光学遥感器进行实验室辐射定标^[23-24]。模拟空间环境(真空、低温),对星上定标系统的探测器进行绝对辐射定标,即

将低温遥感红外载荷分系统产置于真空罐内,模拟星上环境,利用内外黑体,对红外谱段性能指标进行测试,用最小二乘法拟合不同辐亮度值(L_e)和光学遥感器输出灰度值 D_N 得到定标系数 G 和偏移值 $D_{N,0}$ 。利用对辐射定标校正红外遥感器焦平面上各像元间的响应差异进行焦平面的非均匀性校正,提高成像质量。低温红外载荷高精度辐射定标试验按图8进行布局。

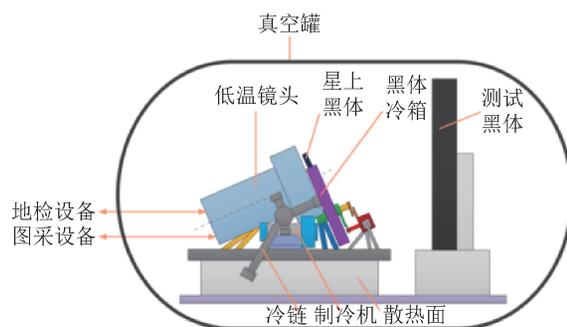


图8 低温红外载荷高精度辐射定标布局图

Fig.8 Low-temperature infrared load high-precision radiometric calibration layout

设计稳定性试验,即内黑体在 104、107、110 K 三种稳定状态下,在增益 1, 18、20、22 ms 三种积分时间的红外载荷参数下连续采集 15 min 后存图,根据 D_N 值变化情况,用全周期内 D_N 值的标准偏差评价系统输出的稳定性。内黑体-深低温黑体的定标灰度图如图9所示,其中 I_{NT} 为积分时间。

D_N 值稳定性结果见表3, $\overline{D_N}$ 分别为每一幅图中,右上、右下、左下、左上、中间共5点位置的 D_N 值取平均得到的结果。表3中, a、b、c、d、e、f、g、h、i 即对应图9的 a、b、c、d、e、f、g、h、i。 ΔD_N 为 D_N 的稳定性描述方式,其结果由 D_N 值作差得到, $\Delta D_{N,1}$ 为 107 K 与 104 K 的 D_N 值的差值, $\Delta D_{N,2}$ 为 110 K 与 107 K 的 D_N 值的差值。

根据图9可知:随着红外载荷深低温黑体的温度升高,红外载荷低温镜头成像 D_N 值变大、灰度图变亮。相同控温环境下,在深低温黑体的每个温度点,随积分时间的增长,红外载荷低温镜头成像规律为 D_N 值变大、灰度图变亮。以上说明内黑体温度越高,能量越强,红外载荷响应越高;积分时间越长,红外载荷响应越高。表3中, $\Delta D_{N,1}$ 均值为 1 573.4, $\Delta D_{N,2}$ 均值为 2 421.3, 图像均匀性优良。由图9和表3可知,深低温黑体均匀性优良。

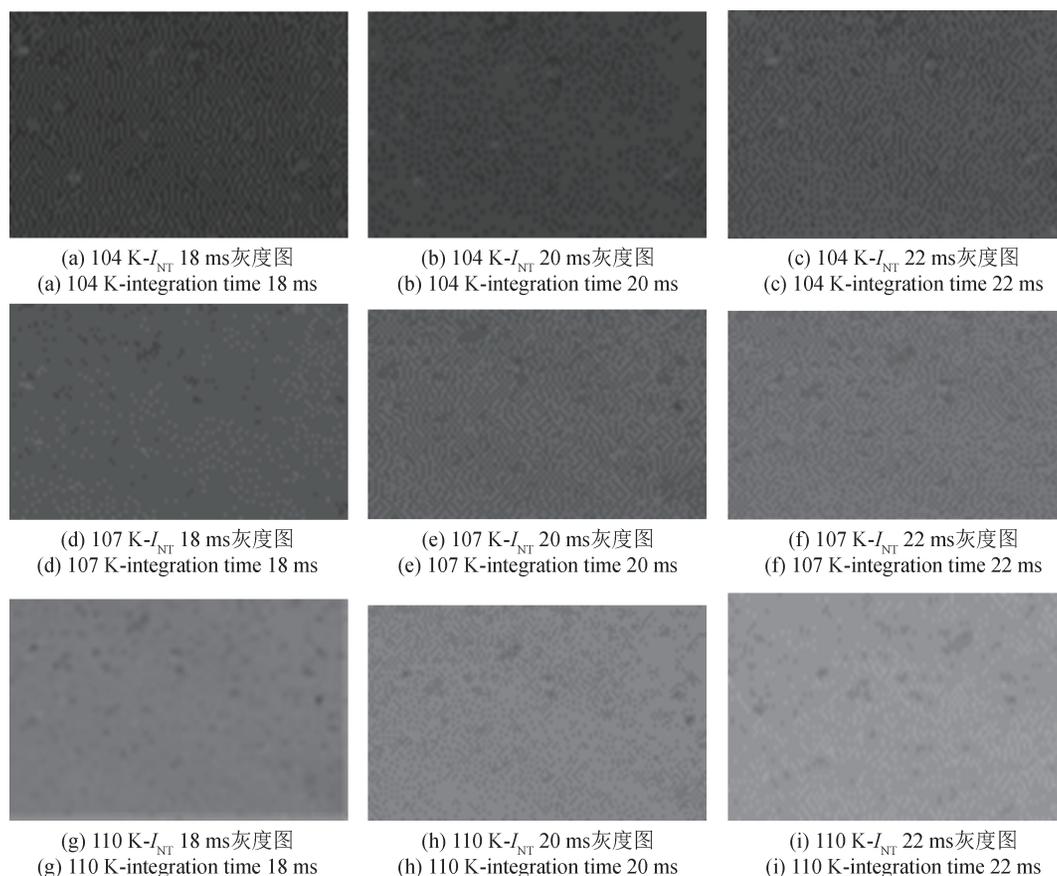


图9 红外载荷高精度辐射定标灰度图

Fig.9 High precision radiometric calibration grayscale images of infrared load

表3 红外载荷辐射定标 D_N 值稳定性表

Tab.3 Stability of infrared load radiometric calibration D_N values

温度/K	D_N 值		
	I_{NT} 为 18 ms 时	I_{NT} 为 20 ms 时	I_{NT} 为 22 ms 时
104	$\overline{D_{N,a}} = 3\ 693.6$	$\overline{D_{N,b}} = 4\ 101.4$	$\overline{D_{N,c}} = 5\ 287.2$
107	$\overline{D_{N,d}} = 5\ 226.2$	$\overline{D_{N,e}} = 5\ 683.8$	$\overline{D_{N,f}} = 6\ 892.4$
110	$\overline{D_{N,g}} = 7\ 627.4$	$\overline{D_{N,h}} = 8\ 101.8$	$\overline{D_{N,i}} = 9\ 337.2$
$\Delta D_{N,1}$	1 532.6	1 582.4	1 605.2
$\Delta D_{N,2}$	2 401.2	2 418.0	2 444.8

深低温黑体真空辐射定标不确定度分析，在不确定指标分解^[23-25]基础上进行。深低温黑体对真空辐射定标不确定度的影响，主要体现在：黑体的发射率、温度稳定性、温度均匀性的不确定度影响。这些不确定度因素会影响遥感红外载荷的定标精度，最终体现为影响遥感红外载荷成像质量，表现为黑体的 D_N 值偏差。

深低温星上黑体：测温误差不超过 $\pm 0.1\text{ K}$ ，温度不确定度 $U_{b-T} = 2.1\%$ ；深低温黑体发射率 $\varepsilon = 0.987$ ，发射率测量不确定度 $U_{99} = 0.025$ ， $k = 2$ ，星上黑体发射率不确定度 $U_{b-\varepsilon} = 0.43\%$ ；黑体温度均匀性 0.1 K ，星上黑体温度均匀性不确定度 $U_{b-u} = 0.37\%$ ；黑体表面控温误差不超过 $\pm 0.1\text{ K}$ ，星上黑体温度稳定性不确定度 $U_{b-s} = 1.17\%$ 。其中，b 为黑体， T 为温度， ε 为发射率， u 为温度均匀性， s 为温度稳定性。星上辐射定标深低温黑体源不确定度分析结果如表 4 所示。

表4 星上辐射定标深低温黑体源不确定度表

Tab.4 Uncertainty of deep low temperature blackbody source for on-board radiometric calibration

不确定度分解	符号	不确定度 / %
黑体源发射率不确定度	$U_{b-\varepsilon}$	0.43
黑体源温度均匀性不确定度	U_{b-u}	0.37
黑体源温度稳定性不确定度	U_{b-s}	1.17
黑体源测温不确定度	U_{b-T}	2.10

将星上定标黑体源各个因素的影响量综合为星上定标黑体源总不确定度, 计算公式为

$$U = \sqrt{U_{b-T}^2 + U_{b-\varepsilon}^2 + U_{b-u}^2 + U_{b-s}^2} = 2.47\% \quad (2)$$

综上, 深低温黑体的不确定度为2.47%。

4 结论

设计了一种基于制冷机主动制冷的深低温星上定标黑体装置(低温100 K工作), 应用于中低轨红外点目标探测成像的透射式光学系统红外载荷辐射定标, 实现遥感器宽光谱范围(2~16 μm)、高发射特性(0.987)、深低温(100 K)的定标需求。深低温黑体发射率 $\varepsilon = 0.987$, 温度均匀性0.1 K, 黑体表面控温误差不超过 ± 0.1 K; 测温误差不超过 ± 0.1 K。深低温黑体对真空辐射定标不确定度比之前的不确定度降低0.23%。深低温星上定标黑体宽谱段发射率设计、深低温制冷实现及热学分析等研究为后续应用提供了技术支撑。该深低温星上定标黑体装置具有精度高、功耗小、结构简单、小型化、易于工程化、全国产器件、便于移植、通用性强等优势, 具有很好的工程应用推广价值。

参考文献

- [1] 王亚妮, 张巍, 迟国春, 等. 制冷机与红外探测器冷链耦合技术研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(2): 148-152.
WANG Y N, ZHANG W, CHI G C, et al. Research of cold chain linking technology between cryocooler and infrared detector[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(2): 148-152. (in Chinese)
- [2] 田大成, 练敏隆, 叶翔, 等. 关于一种高纯铝冷链传热性能的试验研究[J]. 低温工程, 2022, 247(3): 33-36.
TIAN D C, LIAN M L, YE X, et al. Research on heat transfer characteristics of high purity aluminum cold strap [J]. Cryogenics, 2022, 247(3): 33-36. (in Chinese)
- [3] XIONG X, CHIANG K, ESPOSITO J, et al. MODIS on-orbit calibration and characterization [J]. Metrologia, 2003.
- [4] SUN J, XIONG X, MADHAVAN S, et al. Terra MODIS band 27 electronic crosstalk effect and its removal [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2014, 52(3): 1551-1561.
- [5] SHIMIZU Y, KOSHIKAWA H, IMBE M, et al. Large-area perfect blackbody sheets having aperiodic array of surface micro-cavities for high-precision thermal imager calibration [J]. Opt Express, 2020, 28(15): 22606-22616.
- [6] OLSCHESKI F, MONTE C, ADIBEKYAN A, et al. A large-area blackbody for in-flight calibration of an infrared interferometer deployed on board a long-duration balloon for stratospheric research [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(8): 4757-4752.
- [7] 王景辉, 原遵东, 段远源. 大口径高发射率水热管标准黑体辐射[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 841-847.
WANG J H, YUAN Z D, DUAN Y Y. Large aperture high-emissivity water heatpipe standard blackbody radiation source [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 841-847. (in Chinese)
- [8] 徐恒, 韩义中, 杨永军. 黑体辐射的发展[J]. 计测技术, 2009, 29(5): 1-3.
XYU H, HAN Y Z, YANG Y J. Development of blackbody source [J]. Metrology & Measurement Technology, 2009, 29(5): 1-3. (in Chinese)
- [9] 扈又华, 郝小鹏, 司马瑞衡, 等. 大口径高发射率面型黑体辐射的研制[J]. 计量学报, 2021, 42(3): 314-320.
HU Y H, HAO X P, SIMA R H, et al. Development of large-aperture and high-emissivity surface blackbody radiation source [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(3): 314-320. (in Chinese)
- [10] 徐文, 龙小祥, 李庆鹏, 等. “高分四号”卫星影像辐射与几何精度评价[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(4): 16-25.
XYU W, LONG X X, LI Q P, et al. Image radiometric and geometric accuracy evaluation of Gf-4 satellite [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(4): 16-25. (in Chinese)
- [11] 王浩, 晋利兵, 李岩, 等. 基于温度修正的GF-5全谱段光谱成像仪热红外谱段辐射定标[J]. 红外技术, 2020, 330(6): 547-551.
WANG H, JIN L B, LI Y, et al. Radiation calibration of thermal infrared bands of GF-5 VIMI based on temperature correction [J]. Infrared Technology, 2020, 330(6): 547-551. (in Chinese)
- [12] 张可立, 张永超, 马越. 海洋一号C/D卫星在轨交叉定标设计[J]. 航天器工程, 2019, 28(2): 24-29.
ZHANG K L, ZHANG Y C, MA Y. Design of on orbit cross calibration method for HY-1 C/D satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(2): 24-29. (in Chinese)
- [13] 赵艳华, 李岩, 晋利兵, 等. 全谱段光谱成像仪高精度

- 辐射定标技术[J]. 上海航天, 2019, 36(增刊2): 106-111.
- ZHAO Y H, LI Y, JIN L B, et al. High precision radiometric calibration technology for visible and infrared multi-spectral image [J]. Aerospace Shanghai, 2009, 36 (supplement 2): 106-111. (in Chinese)
- [14] BAE J Y, CHOI W, HONG S J, et al. Design, fabrication, and performance evaluation of portable and large-area blackbody system [J]. Sensors, 2020, 58 (36): 1424-8220.
- [15] 王泽江. 多孔结构高吸收涂层的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- WANG Z J. Preparation and properties of porous high absorbing coatings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] 于波, 李春林, 杨涛, 等. 一种基于空间红外载荷热特性的高精度控温方法[J]. 航天返回与遥感, 2014 (6): 84-89.
- YYU B, LI C L, YANG T, et al. A method of high precision temperature control based on thermal characteristics of space camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014(6): 84-89. (in Chinese)
- [17] 杨献伟, 吴清文, 李书胜, 等. 空间光学遥感器热设计[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 139-146.
- YANG X W, WU Q W, LI S S, et al. Thermal design of space optical remote sensor[J]. Chinese Optics, 2011, 4 (2): 139-146. (in Chinese)
- [18] 高有道, 李福东, 沈正祥, 等. 低温红外镜头设计仿真方法及试验验证[J]. 红外与激光工程, 2021.
- GAO Y D, LI F D, SHEN Z X, et al. Simulation method and its test verification of cryogenic infrared lens design [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021. (in Chinese)
- [19] 王阳, 高长春, 孟庆亮, 等. 石墨膜导热带在空间遥感器低温光学上的应用[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(增刊1): 16-21.
- WANG Y, GAO C C, MENG Q L, et al. Application of heat conduction band of graphite film in low temperature optics of space remote sensor[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(supplement 1): 16-21. (in Chinese)
- [20] 王锐东. 基于新型二次聚光器的线性菲涅尔式聚光系统构建及性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- WANG R D. Construction and performance of linear fresnel concentrating system based on novel secondary concentrator[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [21] 舒心, 郝小鹏, 宋健, 等. 100 ~ 400 K真空红外亮温标准黑体辐射研制[J]. 计量学报, 2019, 40(1): 13-19.
- SHU X, HAO X P, SONG J, et al. Research of 100 ~ 400 K vacuum infrared radiance temperature standard blackbody source[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40 (1): 13-19. (in Chinese)
- [22] 赵艳华, 李岩, 晋利兵, 等. 全谱段光谱成像仪高精度辐射定标技术[J]. 上海航天, 2019, 36(增刊2): 106-111.
- ZHAO Y H, LI Y, JIN L B, et al. High precision radiometric calibration technology for visible and infrared multi-spectral image[J]. Aerospace Shanghai, 2009, 36(supplement 2): 106-111. (in Chinese)
- [23] 赵艳华, 王浩, 李云飞, 等. 长波红外空间光学遥感器高精度辐射定标技术[J]. 遥感学报, 2021, 25(8): 1646-1654.
- ZHAO Y H, WANG H, LI Y F, et al. Research on high-precision radiation calibration technology of long-wave infrared space optical remote sensor [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25 (8): 1646-1654. (in Chinese)
- [24] 晋利兵, 李晓曼, 练敏隆, 等. 黑体与恒星相结合的短波红外遥感器在轨辐射定标简析[J]. 红外技术, 2023, 45(2): 123-128.
- JIN L B, LI X M, LIAN M L, 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. (in Chinese)
- [25] 杨永军, 周庆福, 蔡静. 辐射测温技术和溯概述[J]. 计测技术, 2008(增刊1): 6-9.
- YANG G J, ZHOU Q F, CAI J. Overview of radiation thermometry techniques and traceability [J]. Metrology & Measurement Technology, 2008 (supplement 1): 6-9. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 董惠文(1986-), 女, 高级工程师, 主要从事红外遥感载荷总体设计及辐射定标源研究相关工作。