

真空低背景红外高光谱亮温计量标准装置研制

宋健^{1,2,3,4}, 郝小鹏², 丁雷^{1,4}, 李凯², 孙建平²

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国计量科学研究院, 北京 100029;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 为满足红外遥感载荷在辐射定标方面的量值溯源需求, 中国计量科学研究院研制了真空低背景红外高光谱亮温计量标准研究装置。介绍了红外高光谱亮温计量标准装置的设计方案和高光谱分辨的量值传递方法和溯源链等。设计了用于放置用户被校黑体的模拟太空环境的真空低背景实验舱, 建立了包含固定点黑体源和标准变温黑体源在内的标准器, 通过傅里叶变换红外光谱仪将标准黑体源的量值传递给被校黑体辐射源。研制的标准变温黑体辐射源的温度范围覆盖 125~500 K, 口径为 30 mm, 空腔发射率为 0.999 7, 亮度温度标准不确定度优于 0.026 K@300 K/10 μm 。真空固定点黑体包含汞固定点、镓固定点和铟固定点黑体, 口径为 25 mm, 温度不确定度优于 0.020 K@10 μm 。该装置具有高温不确定度水平、高光谱分辨率和扩展性强等特点, 能够满足大部分红外载荷量值的溯源需求。

关键词: 红外高光谱; 亮温; 计量标准; 黑体; 辐射定标

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1004001

Development of reduced background vacuum infrared hyperspectral radiance temperature standard facility

Song Jian^{1,2,3,4}, Hao Xiaopeng², Ding Lei^{1,4}, Li Kai², Sun Jianping²

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The Vacuum Infrared Hyperspectral Radiance Temperature Standard Facility for Infrared Hyperspectral radiance calibration was established at National Institute of Metrology for calibrating the radiance temperature of infrared remote sensing payloads. The state-of-the art of the system was introduced, such as, the structure, the new designed standard blackbody, the calibration method and the traceability. The vacuum reduced background chamber was built for the customer blackbodies. The

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-07-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504700, 2018YFB0504702); 国家自然科学基金(11475162)

作者简介: 宋健(1988-), 男, 博士生, 主要从事红外辐射定标和发射率测量方法方面的研究。Email: songjianbit@qq.com

导师简介: 丁雷(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事航天光学遥感仪器的研制以及光学遥感成像技术、高精度辐射定标技术方面的研究。Email: leiding@mail.sitp.ac.cn

通讯作者: 郝小鹏(1980-), 男, 研究员, 博士, 主要从事红外亮温标准和量值传递方法方面的研究。Email: haoxp@nim.ac.cn

standard blackbodies, including the variable temperature blackbodies and the fixed-point blackbodies, were designed. The radiance temperature of the customer blackbodies were calibrated by the standard blackbodies through a Fourier transform infrared spectrometer. The temperature range of the new designed standard blackbody was from 125 K to 500 K with a 30 mm in diameter and 0.999 7 emissivity of the cavity. The radiance temperature standard uncertainty of the blackbody was better than 0.026 K@300 K/10 μm . The fixed point blackbodies included a mercury blackbody, a gallium blackbody and an Indium blackbody. The cavities diameter were all 25 mm, and the uncertainty of the fixed blackbodies was better than 0.020 K@300 K. The system could support the requirements of lots of infrared remote sensing payloads. This facility can provide the radiance temperature tracebility for most infrared remote sounders with low uncertainty, high spectral resolution and strong extensibility.

Key words: infrared hyperspectral; radiance temperature; measuring standard; blackbody; radiance calibration

0 引言

红外遥感技术正朝着高定量化的方向发展。特别是在气候变化监测和数值天气预报等领域,其对定量化水平的要求更为苛刻。例如,气候变化监测就要求红外遥感载荷必须满足优于 0.1 K 的测量不确定度 ($k=3$)和每十年 0.04 K 的稳定性^[1-2]。如此高的定量化水平对红外载荷的研制提出了新的挑战。这不仅需要高稳定的红外探测器,还需要高精度的在轨辐射定标源。而在此基础上对红外载荷进行高精度的辐射定标是保证其量值准确的唯一途径,这包括了发射前的实验室定标和星上在轨定标等。其中,影响辐射定标水平的因素包含实验室定标黑体不确定度、星上定标黑体不确定度和定标溯源过程等。因此建立能够溯源到国际单位(SI)的计量标准装置从而实现对定标黑体的高精度校准以及建立有效的量值传递体系对提高定标黑体的辐射定标精度就显得尤为关键^[3-7]。

目前,国际上在红外遥感亮度温度计量标准方面已经开展了大量的工作。例如,德国物理技术研究院(PTB)为欧洲对地观测项目的辐射定标工作研制了真空低背景红外亮度温度标准装置^[8],其可以在真空低背景环境下对黑体辐射源进行亮度温度校准。该装置的定标温度范围为 100~700 K,光谱范围 1~1 000 μm 。标准黑体源的发射率大于 0.999 6,黑体温度稳定性优于 0.1 K。该装置在 210~450 K 范围内亮度温度测量的扩展不确定度优于 0.1 K。

中国计量科学研究院于 2013 年开始研制真空

低背景红外高光谱亮度温度计量标准装置(VRTSF),2015 年底完成了第一期的工作,建立了温度范围为 190~340 K 的高光谱量值传递系统^[9-10]。到 2018 年底将实现 125~500 K 的温度范围覆盖和由固定点黑体到变温黑体再到用户被校黑体的量值传递链。

文中介绍了中国计量科学研究院研制的真空低背景红外高光谱亮度温度计量标准装置的系统组成,重点介绍了最新研制的标准变温黑体辐射源和真空镓固定点黑体辐射源的设计和技术指标、装置的工作原理和系统的量值传递方法等。并对系统的测量不确定度进行了分析。

1 真空低背景红外高光谱亮温计量标准装置

1.1 系统结构

中国计量科学研究院建立的真空低背景红外高光谱亮度温度计量标准装置如图 1 所示。该装置主

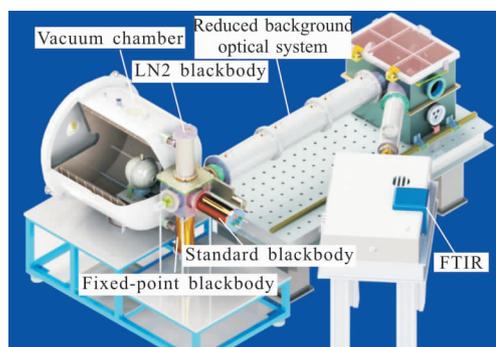


图 1 真空低背景红外高光谱亮温计量标准装置示意图
Fig.1 Sketch map of reduced background vacuum infrared hyperspectral radiance temperature standard facility

要包括真空低背景环模舱、光路切换舱、190~340 K 标准黑体辐射源、125~500 K 标准黑体辐射源、真空镓固定点黑体辐射源、真空汞固定点黑体辐射源、真空铟固定点黑体辐射源、液氮冷却零点黑体辐射源、真空低背景光路系统、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)和数据测试采集系统等部分。该装置采用液氮冷却的真空实验舱和真空管路,实现模拟太空的真空低背景的工作环境。

目前已研制完成包含 190~340 K 标准黑体辐射源和 125~500 K 标准黑体辐射源在内的标准变温黑体辐射源组合以及真空汞、镓、铟固定点黑体辐射源。使得红外高光谱亮度温度计量标准装置的温度覆盖范围能够满足中国包括风云气象卫星在内的绝大部分红外载荷定标黑体的量值溯源需求。用户被校黑体安装在真空环模舱内。标准黑体辐射源和固定点黑体辐射源以及液氮冷却零点黑体安装在光路切换舱上,它们和被校黑体在光路切换舱上的位置关系如图 2 所示。通过光路切换舱内的旋转平面镜的转动实现在不同的测量目标之间的切换,目标信号经过旋转平面镜和离轴椭球镜反射进入 FTIR。使用 FTIR 作为测量仪器实现了高光谱的光谱辐射亮度测量。通过 FTIR 内的液氮制冷的碲镉汞检测器(MCT)实现了 5~20 μm 的光谱覆盖,搭配液氮制冷的碲化铟检测器(InSb)和液氮制冷的 Si-Bolometer 检测器可以扩展光谱范围为 3~100 μm。FTIR 的光谱分辨率优于 0.5 cm⁻¹。装置的主要技术参数列于表 1 中,关于装置各部分的具体参数在参考文献[9]和[10]中进行了具体介绍。下面重点介绍最新研制的 125~500 K 标准黑体辐射源和真空镓固定点黑体辐射源。

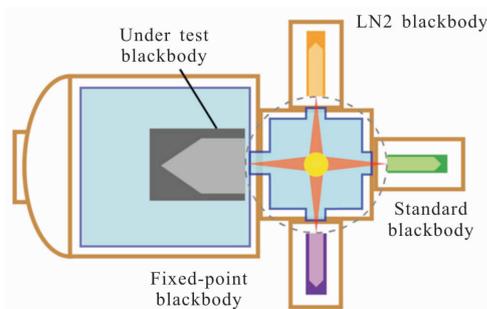


图 2 VRTSF 装置光路切面示意图

Fig.2 Sectional sketch map of the optical path of the VRTSF

表 1 VRTSF 系统的主要技术指标

Tab.1 Specifications of the VRTSF

Specifications	Value
Temperature range/K	125-500
Blackbody emissivity	0.999 9
FTIR	Bruker Vertex 80v
Detector	InSb, MCT, Si-Bolometer
Spectral range/μm	3-100
Spectral resolution/cm ⁻¹	0.5
Vacuum/Pa	5×10 ⁻⁴
Size of chamber	Inner diameter: 850 mm; length: 1 000 mm
Uncertainty	0.026 K@300 K/10 μm(k=1)

1.2 125~500 K 真空标准黑体辐射源

为了进一步拓展装置的温度范围,在 190~340 K 标准黑体辐射源的基础上研制了 125~500 K 的标准黑体辐射源。该黑体辐射源由黑体空腔、液氮冷屏、防辐射屏、液氮管路、温度控制系统和温度测量系统组成。黑体空腔为圆柱-圆锥型,空腔深度为 315 mm,内径 40 mm,空腔口部安装了直径 30 mm 的光阑。黑体结构如图 3 所示。

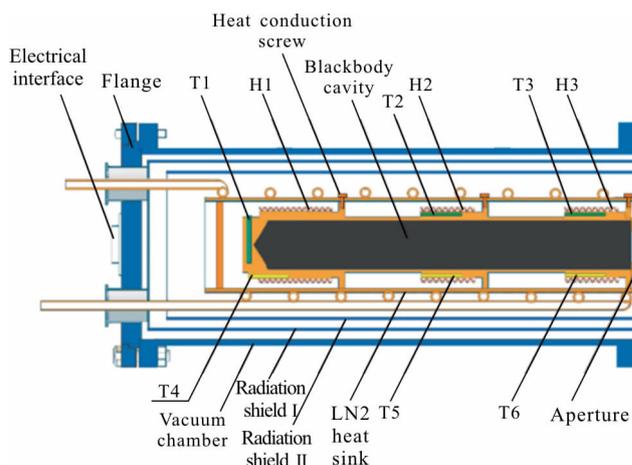


图 3 125~500 K 真空标准黑体辐射源结构

Fig.3 Structure of 125-500 K vacuum standard blackbody

黑体腔内壁表面喷涂日本传感器公司的高发射率涂层 JSC-3,经过测试该涂层的发射率为 0.979^[11]。黑体腔的发射率通过基于蒙特卡洛方法的 STEEP3 软件模拟结果为 0.999 9。黑体采用液氮作为冷源,在液氮冷屏上布置液氮管路连接外部的液氮输送系统。通过液氮冷屏的热传导作用使黑体降温。黑体采用三路加热控温系统,在黑体腔的底部、中部和口部

位置分别设置了一路加热系统,通过三路控温实现黑体腔良好的轴向温度均匀性。同时在黑体腔的锥底、底部、中部和口部分别放置了一支高精度温度传感器,通过连接 ASL F500 测温仪实现黑体的温度采集。

在真空低背景条件下,对黑体的各项性能进行了测试。结果表明:在不同温度下黑体在 25 min 内的温度稳定性均优于 0.02 K,黑体腔的轴向温度均匀性优于 0.067 K。黑体腔轴向温度均匀性测试结果列于表 2 中。使用基于控制环境辐射的发射率测量装置^[11-12]测量黑体腔的发射率为 0.999 7。黑体亮度温度的合成标准不确定度为 0.026 K@300 K/10 μm^[13]。

表 2 125~500 K 真空标准黑体辐射源轴向温度分布 (单位:K)

Tab.2 Radiance temperature distribution of 125-500 K vacuum standard blackbody (Unit:K)

Set temperature	Bottom of cavity	Middle of cavity	Opening of cavity	Axial temperature difference
125	125.249	125.268	125.201	0.067
150	150.089	150.098	150.128	0.039
190	190.893	190.868	190.864	0.029
250	250.152	250.156	250.202	0.050
300	300.248	300.209	300.203	0.045
350	350.204	350.151	350.167	0.053
400	400.144	400.171	400.150	0.026
450	449.988	450.017	449.989	0.029
500	499.927	499.967	499.937	0.041

1.3 真空镓固定点黑体源

真空镓固定点黑体辐射源的结构如图 4 所示。其包含黑体腔、镓固定点腔、液体循环控温系统、防辐射屏和真空外壳等。黑体腔为圆柱-圆锥型,空腔深度为 220 mm,内径 25 mm,。黑体腔内壁表面喷涂高发射率涂层 Nextel 811-21,该涂层的发射率为 0.964^[6]。黑体腔的发射率通过基于蒙特卡洛方法的 STEEP3 软件模拟结果为 0.999 9。黑体腔放置在镓固定点坩埚内。镓固定点坩埚内部灌注了纯度为 99.999 9% 的镓,这样使得黑体腔和坩埚内壁之间充满了金属镓。在镓发生相变的过程中其自身温度保持不变,这为黑体腔提供了稳定均匀的温度环境。镓固定点黑体通过液体循环系统连接外部的恒温循环

器实现温度控制。在镓固定点腔的底部设置了一个用于安装温度传感器的孔,通过安装的 Pt100 铂电阻温度传感器的示值判断镓固定点的相变状态并测量其相变复现性。镓固定点的设计指标列于表 3 中。经过在真空下的测试,真空镓固定点黑体镓点的熔化平台的复现性为 0.002 K。

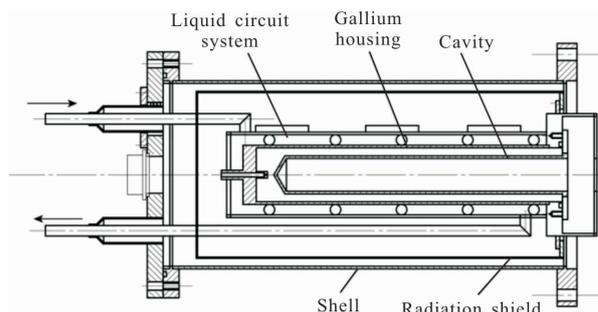


图 4 真空镓固定点黑体辐射源结构图

Fig.4 Structure of vacuum gallium fixed point standard blackbody

表 3 真空镓固定点黑体源的技术指标

Tab.3 Specifications of vacuum gallium fixed point standard blackbody

Specifications	Value
Temperature/K	302.915
Emissivity	≥ 0.999 9
Coating	Nextel 811-21
Diameter of cavity/mm	25
Stability of the plateaus/K	0.01
Standard uncertainty/K	0.020 K@10 μm

2 量值传递方法

根据普朗克方程,理想黑体的光谱辐射亮度由黑体的温度、波长决定:

$$L_{\nu}(T) = \frac{2hc^2\tilde{\nu}^3}{\exp\left(\frac{hc\tilde{\nu}}{k_B T}\right) - 1} \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为真空下的光速; k_B 为玻耳兹曼常数; $\tilde{\nu}$ 为波数, cm^{-1} ; T 为黑体的温度,K。实际使用的黑体其发射率小于 1,从黑体实际辐射的信号包含了黑体自身发射的信号和黑体反射的背景辐射的信号,

$$L(T_{bb}) = \varepsilon_{bb} L_{\nu}(T_{bb}) + (1 - \varepsilon_{bb}) L(T_{cm}) \quad (2)$$

式中： ε_{bb} 为黑体的发射率； $L_{\nu}(T_{\text{bb}})$ 为根据公式(1)计算的黑体发射的信号； T_{bb} 为黑体的温度； $L(T_{\text{en}})$ 为黑体接收到的来自环境的有效辐射； T_{en} 为环境有效温度。

在量值传递过程中，将用户被校黑体和标准黑体源设置在相同的温度，使用光谱仪分别测量标准黑体、液氮冷却零点黑体和用户被校黑体的光谱信号。通过不断测量液氮冷却的零点黑体实现消除探测器的漂移以及背景辐射。

对于标准变温黑体，光谱仪测量的在波数 $\tilde{\nu}$ 下信号 \tilde{L}_{stbb} 可以由下式给出：

$$\tilde{L}_{\text{stbb}} = s[\rho_1 \rho_2 L(T_{\text{stbb}}) + L_{\text{Background}} - L_{\text{Detector}}] \quad (3)$$

式中： ρ_1 为平面反射镜的反射率； ρ_2 为离轴椭球镜的反射率； s 为光谱仪在波数 $\tilde{\nu}$ 下的光谱响应度； $L_{\text{Background}}$ 为装置和光谱仪内在波数 $\tilde{\nu}$ 下到达探测器的背景辐射亮度； L_{Detector} 为探测器在波数 $\tilde{\nu}$ 下的光谱辐射亮度； $L(T_{\text{stbb}})$ 为黑体在波数 $\tilde{\nu}$ 下的实际光谱辐射亮度，根据公式(2)计算。

对于液氮冷却的零点黑体和待测黑体，由于它们与标准黑体对称布置，三者有相同的测量系统。它们的测量模型与标准变温黑体相同。其光谱仪的测量信号可以由下式给出：

$$\tilde{L}_{\text{zero}} = s[\rho_1 \rho_2 L(T_{\text{zero}}) + L_{\text{Background}} - L_{\text{Detector}}] \quad (4)$$

$$\tilde{L}_{\text{utbb}} = s[\rho_1 \rho_2 L(T_{\text{utbb}}) + L_{\text{Background}} - L_{\text{Detector}}] \quad (5)$$

式中： $L(T_{\text{zero}})$ 为零点黑体的光谱辐射亮度，同样可以由公式(2)计算。用公式(3)减去公式(4)，可以得到：

$$\tilde{L}_{\text{stbb}} - \tilde{L}_{\text{zero}} = s \rho_1 \rho_2 (L(T_{\text{stbb}}) - L(T_{\text{zero}})) \quad (6)$$

对于待测黑体同样可以得到公式：

$$\tilde{L}_{\text{utbb}} - \tilde{L}_{\text{zero}} = s \rho_1 \rho_2 (L(T_{\text{utbb}}) - L(T_{\text{zero}})) \quad (7)$$

公式(6)和公式(7)相除，得到：

$$\frac{\tilde{L}_{\text{utbb}} - \tilde{L}_{\text{zero}}}{\tilde{L}_{\text{stbb}} - \tilde{L}_{\text{zero}}} = \frac{L(T_{\text{utbb}}) - L(T_{\text{zero}})}{L(T_{\text{stbb}}) - L(T_{\text{zero}})} \quad (8)$$

公式(8)中等式左边各项均为光谱仪测量的信号。等式右边标准黑体和液氮黑体的光谱辐射亮度 $L(T_{\text{stbb}})$ 和 $L(T_{\text{zero}})$ 可以通过公式(2)计算出来。这样就可以计算出待测黑体的辐射亮度 $L(T_{\text{utbb}})$ 。

$$L(T_{\text{utbb}}) = \frac{\tilde{L}_{\text{utbb}} - \tilde{L}_{\text{zero}}}{\tilde{L}_{\text{stbb}} - \tilde{L}_{\text{zero}}} [L(T_{\text{stbb}}) - L(T_{\text{zero}})] + L(T_{\text{zero}}) \quad (9)$$

这样再通过普朗克方程就可以计算出待测黑体的亮度温度。

3 系统测试结果

3.1 亮度温度测量

根据上一节的量值传递方法，在 125~500 K 温度范围内选择多个温度点测量了标准黑体和液氮零点黑体的信号。

标准黑体的温度分别设置在 125、150、190、250、300、350、400、450、500 K，光谱仪测量的不同温度下的标准黑体的信号扣除液氮零点黑体的信号后的光谱信号如图 5 所示。根据公式(6)可得，光谱仪测量的信号和黑体的光谱亮度信号成线性关系，在某一波长下根据不同温度下光谱仪的信号计算出黑体的光谱亮度信号，从而得到在 125~500 K 范围内不同波长下黑体的亮度温度分布如图 6 所示。

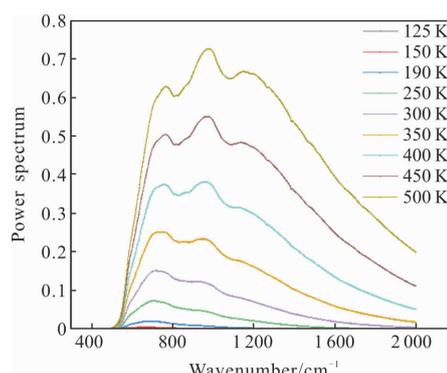


图 5 光谱仪测量的不同温度下标准黑体扣除背景后的信号
Fig.5 Signal of standard blackbody deducting the background in different temperature measured by FTIR

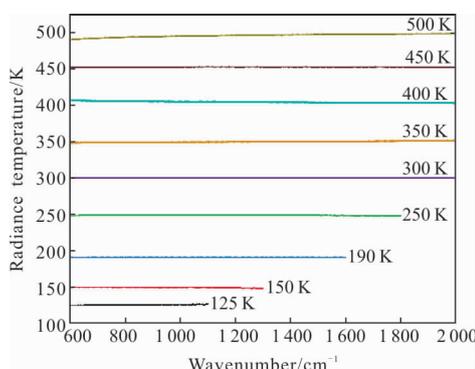


图 6 根据光谱仪测量信号反算的标准黑体的亮度温度分布
Fig.6 Radiance temperature distribution of standard blackbody calculated from the signal in FTIR

3.2 系统测量的不确定度评定

系统测量的不确定度来源包含标准黑体的亮度温度和 FTIR 测量稳定性等因素。其中根据国际温度咨询委员会第五工作组(CCT-WG5)给出的变温黑体的不确定度评定指导文件^[14],标准黑体源亮度温度不确定度主要来源有:温度传感器校准、电测仪表、黑体腔底部导热温差、黑体腔底部温度均匀性、黑体控温稳定性、黑体辐射源的有效发射率和环境温度变化等。在参考文献[13]中对不确定度的每一项的影响给出了具体的评定过程,文中以此为基础进行分析。不同温度不同波长下标准黑体亮度温度的不确定度列于表 4 中。FTIR 在测量目标处于不同温度下的测量稳定性时,通过将标准黑体控制在各个温度点下使用 FTIR 重复测量 10 次结果的标准偏差换算成温度的变化得到。不同温度及波长下 FTIR 的测量稳定性对测量结果的影响列于表 5 中,在低温时造成光谱仪测量稳定性差的主要因素是目标信号弱,信噪比差。不同温度和波长下系统测量的不确定度如表 6 所示。

表 4 125~500 K 真空标准黑体辐射源亮度温度不确定度

Tab.4 Radiance temperature uncertainty of 125–500 K vacuum standard blackbody

Temperature /K	Combined standard uncertainty/K				
	8 μm	10 μm	12 μm	14 μm	16 μm
125	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
150	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
190	0.025	0.025	0.025	0.025	0.026
250	0.025	0.025	0.026	0.026	0.027
300	0.025	0.026	0.027	0.028	0.031
350	0.026	0.027	0.029	0.033	0.036
400	0.027	0.030	0.034	0.039	0.042
450	0.028	0.034	0.040	0.045	0.049
500	0.032	0.040	0.047	0.052	0.056

表 5 FTIR 测量稳定性

Tab.5 Measurement stability of FTIR

Temperature /K	Combined standard uncertainty/K				
	8 μm	10 μm	12 μm	14 μm	16 μm
125			0.120	0.064	0.074
150		0.096	0.081	0.053	0.073
190	0.030	0.026	0.015	0.013	0.015
250	0.018	0.015	0.011	0.011	0.014
300	0.007	0.005	0.006	0.009	0.013
350	0.006	0.005	0.006	0.008	0.011
400	0.004	0.004	0.005	0.007	0.010
450	0.004	0.004	0.005	0.007	0.010
500	0.004	0.004	0.005	0.007	0.010

表 6 VRTSF 标准不确定度

Tab.6 Standard uncertainty of VRTSF

Temperature /K	Combined standard uncertainty/K				
	8 μm	10 μm	12 μm	14 μm	16 μm
125			0.122	0.069	0.079
150		0.099	0.085	0.059	0.077
190	0.039	0.036	0.030	0.029	0.030
250	0.031	0.030	0.028	0.028	0.030
300	0.026	0.026	0.028	0.030	0.033
350	0.026	0.027	0.030	0.034	0.038
400	0.027	0.030	0.034	0.039	0.044
450	0.029	0.034	0.040	0.046	0.050
500	0.032	0.040	0.047	0.053	0.057

4 量值传递体系

到 2018 年底,中国计量科学研究院将建立以傅里叶光谱仪作为传递仪器的由真空固定点黑体辐射源到真空变温黑体辐射源再到用户被校黑体的真空低背景红外高光谱亮温标准传递体系。辐射亮度信号通过固定点黑体辐射源直接溯源的 ITS-90 国际温标,实现高精度的量值传递。利用傅里叶变换光谱仪作为传递仪器实现了高光谱分辨的能力。其中真空固定点黑体辐射源包含汞、镓和铟固定点黑体辐射源,标准变温黑体辐射源的温度范围为 125~500 K。同时研制了真空红外辐射温度计作为传递仪器。红外亮度温度量值传递溯源体系如图 7 所示。

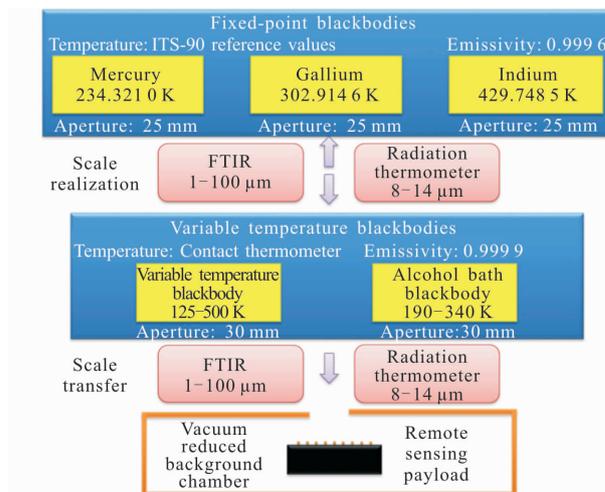


图 7 中国计量科学研究院红外高光谱亮温量值传递体系
Fig.7 Traceability chain for infrared hyperspectral radiance temperature standard of NIM

从 2015 年设备建成至今,该装置已经为包括高分五号实验室定标黑体,风云三号实验室定标黑体

和星上定标黑体等在内的定标黑体源提供了高精度的量值传递服务。

5 结 论

文中系统地阐述了中国计量科学研究院研制的真空低背景红外高光谱亮度温度计量标准装置的详细情况,其温度范围覆盖 125~500 K,系统测量不确定度为 $0.026\text{ K}@300\text{ K}/10\text{ }\mu\text{m}(k=1)$ 。研制了 125~500 K 标准变温黑体和包括真空镱固定点在内的固定点黑体,完善了传递溯源链。实现了从固定点黑体到变温黑体到用户被校黑体的传递体系,使得黑体亮度温度能够直接溯源到 SI 国际单位。该装置与其他国家计量院的标准装置相比,具有扩展性强,标定黑体的口径大,不确定度水平高等特点,为中国红外遥感量值水平提高和国际等效提供了重要保障。

参 考 文 献:

- [1] Anderson J G, Dykema J A, Goody R M, et al. Absolute, spectrally-resolved, thermal radiance: a benchmark for climate monitoring from space [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2004, 85(3): 367-383.
- [2] Dykema J A, Anderson J G. A methodology for obtaining on-orbit SI-traceable spectral radiance measurements in the thermal infrared [J]. *Metrologia*, 2006, 43: 287-293.
- [3] Fan Bin, Chen Xu, Li Bicen, et al. Technical innovation of optical remote sensing payloads onboard GF-5 satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0102002. (in Chinese)
- [4] Zou Qianjin, Liu Lianwei, Chen Qianrong, et al. Calibration experiments of infrared detecting system with fixed focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1204004. (in Chinese)
- [5] Hu Xiuqing, Zhang Liyang, Zheng Zhaojun, et al. FY-3A multi-detector radiometric calibration for infrared band of medium resolution spectral imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1972-1980. (in Chinese)
- [6] Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Combined radiometric calibration of ground-based large-aperture infrared photoelectric systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2541-2550. (in Chinese)
- [7] Mao Jinghua, Wang Yongmei, Shi Entao, et al. Spectral calibration based on echelle [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 376-382. (in Chinese)
- [8] Monte C, Gutschwager B, Morozova S P, et al. Radiation thermometry and emissivity measurements under vacuum at the PTB [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2009, 30(1): 203-219.
- [9] Hao X P, Song J, Xu M, et al. Vacuum radiance-temperature standard facility for infrared remote sensing at NIM [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 39(6): 78.
- [10] Hao Xiaopeng, Song Jian, Sun Jianping, et al. Vacuum radiance temperature national standard facility for Infrared remote sensors of Chinese Fengyun meteorological satellites [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1845-1851. (in Chinese)
- [11] Song Jian, Hao Xiaopeng, Yuan Zundong, et al. Research of ultra-black coating emissivity based on a controlling the surrounding radiation method [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2018, 39(7): 85.
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] Shu Xin, Hao Xiaopeng, Song Jian, 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)
- [14] Saunders P, Fischer J, Sadli M, et al. Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2008, 29(3): 1066-1083.