

文章编号 1004-924X(2015)07-1845-07

# 风云卫星的红外遥感亮度温度国家计量标准装置

郝小鹏<sup>1\*</sup>, 宋健<sup>1</sup>, 孙建平<sup>1</sup>, 许敏<sup>2</sup>, 原遵东<sup>1</sup>, 刘曾林<sup>1</sup>

(1. 中国计量科学研究院 热工计量科学研究所, 北京 100029;

2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘要:**综述了国际上美国、德国、俄罗斯的典型红外遥感亮度温度标准装置的研究现状,着重介绍了由中国计量科学研究院研制的用于风云卫星红外载荷黑体定标的红外遥感亮度温度国家计量标准装置(VRTSF)。给出了VRTSF的设计方案,描述了它的结构和光路。设计了满足风云卫星红外载荷定标黑体工作环境的真空低背景实验舱,建立了满足量值溯源需求的标准黑体辐射源作为量值标准器。标准变温黑体辐射源的温度覆盖190 K~340 K,口径为30 mm,空腔发射率为0.999 9,温度不确定度优于50 mK@300 K/10  $\mu\text{m}$ ( $k=2$ )。该装置的光谱为(1-1 000)  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率为0.2  $\text{cm}^{-1}$ ,可满足多种红外载荷的定标需求。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,如未来该装置温度覆盖至(100-500)K,将会满足大部分红外载荷量值的溯源需求。

**关键词:**风云气象卫星;红外遥感;亮度温度;定标黑体;国家计量标准

**中图分类号:**P414.4;TP722.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1845

## Vacuum radiance temperature national standard facility for Infrared remote sensors of Chinese Fengyun meteorological satellites

HAO Xiao-peng<sup>1\*</sup>, SONG Jian<sup>1</sup>, SUN Jian-ping<sup>1</sup>, XU Min<sup>2</sup>, YUAN Zun-dong<sup>1</sup>, LIU Zeng-lin<sup>1</sup>

(1. Radiation Thermometry Laboratory, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

\* Corresponding author, E-mail: haoxp@nim.ac.cn

**Abstract:** The state-of-the art of the typical national standard vacuum radiance temperature facilities for infrared remote sensing in America, Germany, and Russia were introduced. Especially, the Vacuum Radiance Temperature National Standard Facility (VRTSF) developed by National Institute of Metrology of China for calibrating the radiance temperature of Chinese Fengyun meteorological satellite was described in detail. The design scheme of the VRTSF was given and its structure and optical path were introduced. The vacuum reduced background chamber for the big aperture blackbody was built to calibrate the infrared remote sensor, and the standard value of the radiance temperature was transmitted from the standard blackbody to the customer blackbody by a Fourier Transform Infrared Radiometer (FTIR). The temperature range of the standard blackbody is from 190 K to 340 K with a diameter of 30 mm and emissivity of 0.9999 in a cavity. The uncertainty of this blackbody is 5 050 mK

收稿日期:2015-03-20;修订日期:2015-04-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11475162)

@300 K/10  $\mu\text{m}$ . The wavelength range of the VRTSF is 1  $\mu\text{m}$  to 1 000  $\mu\text{m}$  and its resolution is 0.2  $\text{cm}^{-1}$ , which supports the requirements of lots of infrared remote sensing. The VRTSF built at the NIM China is characterized by higher uncertainty, higher spectral resolution and stronger expansibility. The temperature range of the VRTSF will expand to 100 K–500 K in future, which can meet the requirements for calibration of the most of infrared remote sensing instruments.

**Key words:** FY meteorological satellite; infrared remote sensing; radiance temperature; calibration blackbody; national standard

## 1 序 言

风云气象卫星的研制工作始于 20 世纪 70 年代,经历了三十多年的发展,目前实现了 4 个系列 9 颗卫星的发射和正常工作,成为了世界气象卫星观测系统的重要组成部分。随着全球气候变化的加剧,天气预报、环境监测对气象卫星观测系统的测量精度的要求越来越高。例如,目前对于光谱辐亮度和海洋表面温度监测的不确定度要求为 0.1 K 和每 10 年 0.04 K 的稳定性,相对于对地观测系统红外谱段的稳定性优于 0.01 K<sup>[1]</sup>。

目前,对风云气象卫星红外谱段的亮度温度不确定度要求也在不断提高,已经由 1 K 提高到现在的 0.7 K,未来 10 年将会提高到 0.1 K。随着我国对地观测卫星的不断发展和风云系列卫星数据质量的大幅提升,我国的对地观测系统的发展趋势由定性测量到定量测量,由局部观测到全球观测,由单参量观测到复杂参量协同观测,对地观测数据系统的各载荷的量值需统一单位,即国际单位(SI),因此建立红外遥感亮度温度国家标准装置,实现我国红外遥感亮度温度的有效溯源具有重要意义。

国际上在红外遥感亮度温度标准方面做了大量的研究工作。美国标准技术研究院为红外遥感载荷的定标研制了中温背景红外亮度温度标准装置<sup>[2]</sup>、低温背景红外亮度温度标准<sup>[3]</sup>和红外传递辐射计等标准装置等<sup>[4]</sup>,并且为了满足气候变化监测计划项目 CLARREO 高精度的定标需求,研发了新一代红外亮度温度标准<sup>[5]</sup>。德国物理技术研究院作为欧洲对地观测项目红外定标标准的研究单位,研制了真空低背景红外亮度温度标准装置<sup>[6]</sup>,并完成了欧洲局地观测项目传感器的标定工作<sup>[7, 8]</sup>。俄罗斯全俄光学计量院研制了真空红外标定装置和真空标准黑体辐射源<sup>[9-12]</sup>。

中国计量科学研究院作为国家最高计量科学研究中心和国家量值体系的源头,于 2013 年开始了红外遥感亮度温度标准装置的研制工作,提出了围绕国产遥感卫星红外亮度温度标准的研究方案,规划了红外亮度温度量值传递体系,目的是为我国红外遥感卫星亮度温度提供计量标准器。

本文在系统地介绍国际上红外遥感亮度温度标准装置研究进展的基础上,详细阐述了中国计量科学研究院研制的红外遥感亮度温度国家标准的系统组成、工作原理、标准黑体的设计和技术指标,以及高光谱分辨的量值传递方法等。

## 2 红外遥感亮度温度标准研究现状

### 2.1 德国物理技术研究院(PTB)真空低背景红外亮度温度标准装置

德国 PTB 研制了真空低背景红外遥感亮度温度标准装置(RBCF),建立了温度在 100~703 K,波长为 1~1 000  $\mu\text{m}$  的红外亮度温度标准,其变温黑体的空腔开口直径为 20 mm,发射率大于 0.999 6,温度稳定性小于 0.1 K,系统如图 1 所示<sup>[6-8]</sup>。

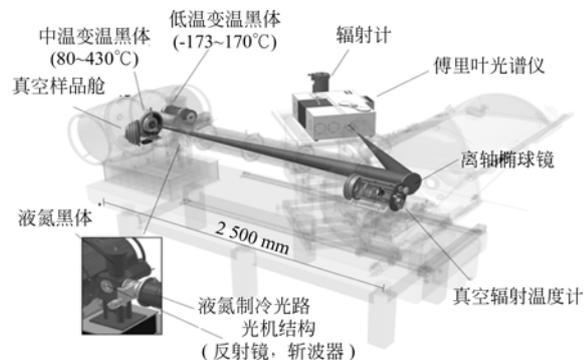


图 1 德国 PTB 的 RBCF 红外亮度温度标准装置透视图  
Fig. 1 Transparent view of RBCF of PTB

RBCF 建立了以铟(429.748 5 K)和镓(302.914 6 K)固定点黑体作为参考黑体源,由低温变温黑体(100~450 K)和中温变温黑体(423~703 K)组成的温度覆盖 100~703 K 的真空红外亮度温度标准黑体,通过高分辨真空型傅里叶光谱仪和 8~14 μm 真空红外辐射温度计组成的传递仪器的量值传递体系,如图 2 所示。其中傅里叶光谱仪采用德国布鲁克 Vertex 80 V,其配备的近红外、中红外和远红外检测器分别为 InSb、MCT 和 Si-辐射热测定器。低温变温黑体的合成不确定度为( $k=1$ )0.029K@300 K/10 μm。

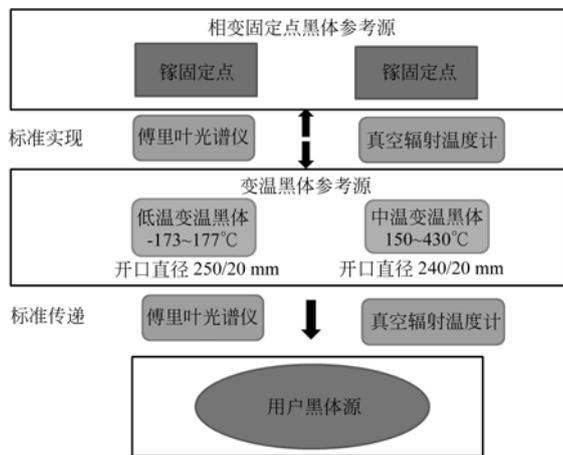


图 2 德国 PTB 真空低背景红外亮度温度传递体系  
Fig. 2 Traceability chain for infrared radiance temperature standard of RBCF of PTB

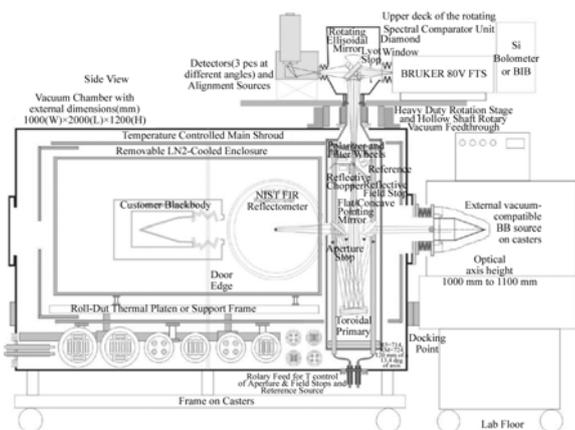


图 3 美国 NIST 控制背景光谱辐射计和光谱光度计测量系统(CBS3)  
Fig. 3 Overview of CBS3 of NIST

## 2.2 美国标准技术研究院(NIST)控制背景光谱辐射计和光谱光度计测量系统(CBS3)

美国 NIST 为气候绝对亮度和反射观测计划(CLARREO)研制了一套控制背景光谱辐射计和光谱光度计测量系统,如图 3 所示<sup>[5]</sup>。通过可控温的真空舱实现不同温度背景的控制,固定点黑体和变温黑体均采用可分离的方式,具有较好的扩展性。其固定点黑体由汞(234.315 6 K)、水(273.160 0 K)和镓(302.914 6 K)固定点黑体组成,口径均为 25 mm。而变温黑体由液氮冷却黑体 77~203 K、酒精浴槽黑体 188~348 K、水浴槽黑体 278~348 K 和水热管黑体 328~523 K 等 4 个变温黑体辐射源组成,是温度覆盖 77~523 K 的标准黑体,其空腔口径为 38 mm。该系统已经完成了所有的系统设计,由于经费原因推迟实施。

美国 NIST 的 CBS3 系统实现了以固定点黑体为参考辐射源,以变温黑体作为工作标准器,以傅里叶光谱仪和光谱传递辐射计作为传递仪器的量值传递体系,其量值传递链如图 4 所示。

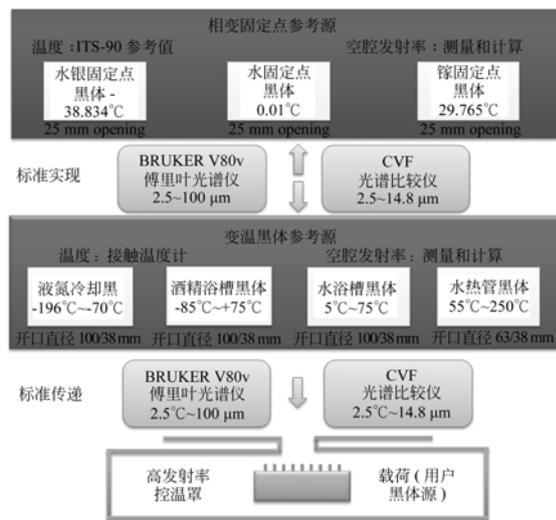


图 4 美国 NIST 的 CBS3 亮度温度量值传递体系  
Fig. 4 Traceability chain for infrared radiance temperature standard of CBS3 of NIST

## 2.3 俄罗斯全俄光学计量研究所(VNIIOFI)低温红外亮度温度标准装置

俄罗斯 VNIIOFI 的真空红外亮度温度标准装置覆盖的温度为 213~353 K,其采用波长为 2.5~14 μm 的滤光片辐射计作为传递仪器,其装置示意如图 5 所示<sup>[9]</sup>。变温黑体辐射源空腔开口

直径为 30 mm,空腔发射率为 0.999 9,温度计分度不确定度为 0.01 K。镱固定点黑体辐射源空腔开口直径为 20 mm,发射率为 0.999 9,温度复现性为 0.2 mK。建立了由镱固定点黑体到变温黑体的量值传递链。

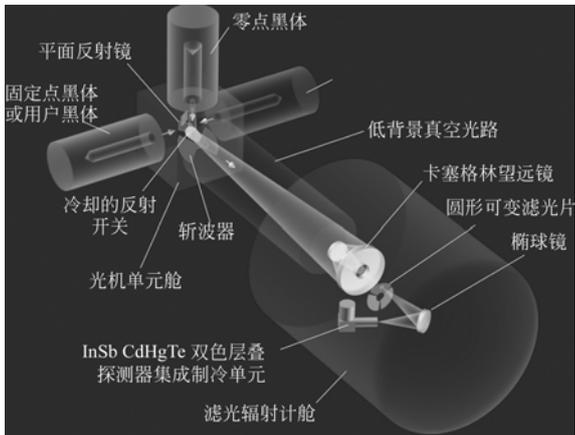


图 5 俄罗斯低温红外亮度温度标准装置示意图

Fig. 5 Overview of low temperature vacuum radiance temperature standard facility

### 3 中国计量科学研究院(NIM)红外亮度温度标准装置(VRTSF)

#### 3.1 系统结构

中国 NIM 为我国风云气象卫星红外遥感载荷研究建立了红外亮度温度标准装置,如图 6 所示。该装置采用液氮冷却真空实验舱和真空测量光路实现低温度背景的工作环境,标准黑体的温度覆盖 190~340 K,满足我国风云气象卫星红外载荷定标黑体的量值溯源需求。我国在研和未来

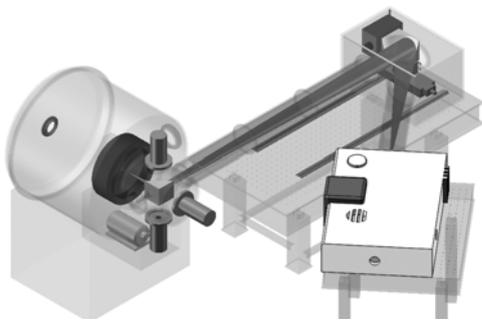


图 6 NIM 真空低背景红外亮度温度标准装置示意图

Fig. 6 Overview of vacuum radiance temperature standard facility (VRTSF) of NIM

规划的红外遥感仪器覆盖的温度为 100~500 K,某些特殊型号仪器上限达到 700 K,为此 VRTSF 会进一步扩展温度至 100~700 K,基本满足我国红外遥感载荷定标黑体的量值溯源的实际需求。该装置由被校黑体真空低温舱、光路切换舱、真空标准黑体辐射源、液氮冷却“零点”黑体、真空低真空光路、傅里叶光谱仪测量系统和真空抽气系统等组成。系统的结构和参数如表 1 所示。

表 1 VRTSF 系统的主要技术指标

Tab. 1 Specifications of VRTSF

指标	设计要求
温度/K	190~340
真空标准黑体空腔发射率(190~340 K)	0.999 9
空腔开口直径/mm	30
空腔深度/mm	300
空腔的涂层	Nextel Velvet-coating 811-21
傅里叶光谱仪	Bruker Vertex 80V
检测器	InSb, MCT, Si-辐射热测定器
光谱范围/ $\mu\text{m}$	1~1 000
真空度/Pa	$5 \times 10^{-4}$
被校黑体真空舱/mm	内径: 850; 长: 1 000
离轴椭圆镜的直径/mm	170
用户黑体的外径要求/mm	直径: 750; 长度: 800
不确定度( $k=2$ )	50 mK@300 K/10 $\mu\text{m}$

#### 3.2 被校黑体真空低温舱

用于放置被校黑体的真空低温舱的内部有效直径为 850 mm,长度为 1 000 mm,满足直径 750 mm 以内的大口径黑体的量值溯源需求。该舱具有液氮冷却的热沉,内表面喷高发射率黑漆涂层,以此来降低背景辐射。舱内还设置了可以推拉的平台,用于被校黑体的支撑和位置调节。

#### 3.3 光路切换舱

光路切换舱主要作用是实现被校黑体真空低温舱、标准变温黑体、固定点黑体和液氮冷却零点黑体与红外光谱仪测量光路的连接,并通过旋转平面镜实现辐射源光路切换。该舱采用液氮浸泡热沉的方式保障内壁温度在液氮温度,光路切换如图 7 所示。

#### 3.4 真空标准变温黑体辐射源

标准黑体辐射源为真空红外亮度温度的量值

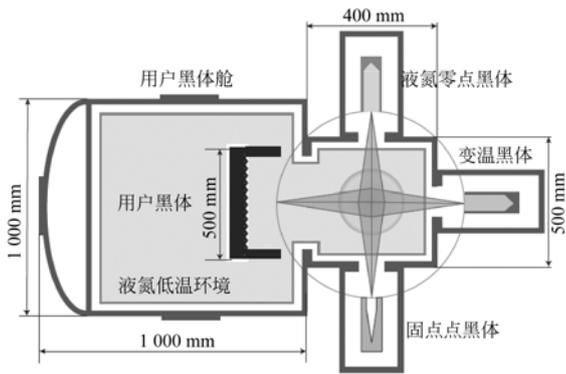


图7 中国 NIM 的 VRTSF 装置光路切面示意图

Fig.7 Overview of optical path of VRTSF

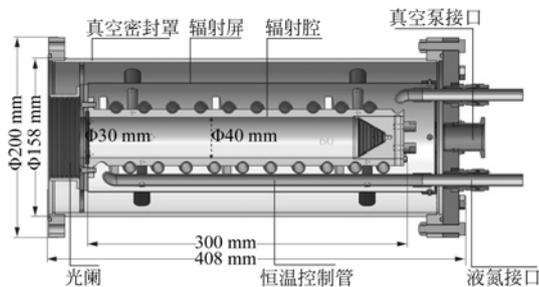


图8 为 VRTSF 标准变温黑体辐射源示意图

Fig.8 Variable temperature standard blackbody of VRTSF

标准器,结构如图8所示。其覆盖的温度为 190~340 K,采用德国劳达 RP890C 恒温循环器控制空腔温度,其黑体空腔开口直径为 30 mm,空腔内径为 40 mm,底部采用 60°锥角,空腔深度为 300 mm。空腔内部喷涂高发射率黑漆 Nextel Velvet 811-21。通过蒙特卡罗软件 STEEP3 计算,当黑漆涂层发射率为 0.95 时,空腔发射率达 0.999 9<sup>[13]</sup>。空腔前、中和后部分别设置了 9 个测温点,采用高精度的铂电阻温度计来监测黑体空腔温度均匀性,腔底采用标准铂电阻温度计作为黑体的标准温度值。温度计的电阻由 Fluke 高分辨测温电桥 1595A 采集。利用内径为 10 mm 的铜管嵌入黑体空腔的外壁,并且采用金属锡固定,提高导热性。黑体空腔外部由喷金的防辐射屏和聚四氟乙烯构成,在提供支撑的同时,也降低了黑体温度与外壳温度的相互影响。

### 3.5 液氮冷却零点黑体辐射源

液氮冷却零点黑体辐射源利用真空内置杜瓦瓶,将黑体空腔浸泡在液氮中,并与真空隔离,使其保持液氮温度,以此作为傅里叶光谱仪的参考

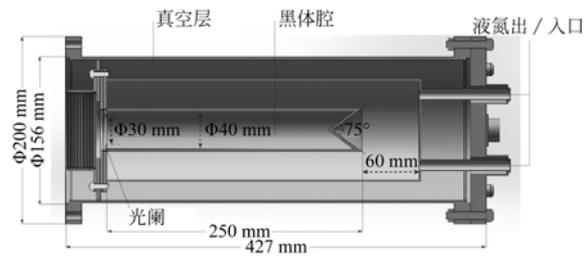


图9 为 VRTSF 液氮冷却零点黑体辐射源

Fig.9 Zero point blackbody by liquid nitrogen of VRTSF

零点。其黑体空腔口径为 30 mm,内径为 40 mm,腔深为 250 mm,腔底采用倒锥的形式,锥角为 75°。通过蒙特卡罗软件 STEEP3 计算,当黑漆涂层发射率为 0.95 时,空腔发射率可达 0.999 7<sup>[13]</sup>。

### 3.6 真空低温光路

真空低温光路采用平面反射镜和离轴椭球镜组成的低温光路,离轴椭球镜采用口径为 170 mm,厚度为 10 mm 的高纯度无氧铜,焦距分别为 2 758 mm 和 1 400 mm,夹角为 40°,离轴量为 597.12 mm,顶点曲率半径  $R = -1 642$  mm,表面镀金处理。该光路系统可收集黑体辐射源的光谱辐射信号,并将其反射汇聚进入真空傅里叶光谱仪中。光路切换舱和离轴镜舱之间的真空管路采用液氮冷却,并且设置多个液氮冷却的光阑来降低杂散光的影响。

### 3.7 真空傅里叶光谱仪

傅里叶光谱仪采用德国布鲁克 Vertex 80V 真空型傅里叶光谱仪,光谱分辨率为  $0.2 \text{ cm}^{-1}$ ,光谱为  $1 \sim 1 000 \mu\text{m}$ ,主要的检测器有 DTGS 非制冷型检测器,InSb 和 MCT 等液氮制冷型检测器,以及 Si-辐射热测定器液氮制冷型远红外检测器。光谱仪与真空系统采用金刚石窗片隔离。

### 3.8 真空抽气系统

真空抽气系统采用德国莱宝的磁悬浮分子泵 MAG2200 和涡旋干泵 SC60D,抽速分别为 2 200 L/s 和  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 。可以满足真空舱无油污和  $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  真空度的要求。

### 3.9 量值传递体系

2015 年底,中国计量科学研究院将建立由真空变温黑体作为标准器,由傅里叶光谱仪作为传递仪器的真空低背景红外遥感亮度温度标准传递体系。为满足我国在研和规划红外相机的定标需

求,未来 3 年将进一步扩展标准黑体辐射源的温度至 100~500 K,研制汞、镓和钢固定点黑体辐射源作为参考标准器,研制覆盖 100~500 K 的真

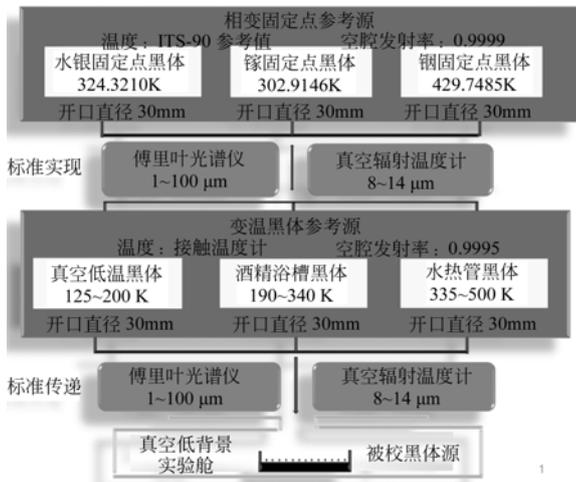


图 10 为中国 NIM 的红外亮度温度量值传递体系  
Fig. 10 Traceability chain for infrared radiance temperature standard of NIM

#### 参考文献:

- [1] OHRING G, WIELICKI B, SPENCER R, *et al.*. Satellite instrument calibration for measuring global climate change [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2005, 86: 1303-1313.
- [2] FLOWLER J B, JOHNSON B C, RICE J P, *et al.*. The new cryogenic vacuum chamber and blackbody source for infrared calibrations at the NIST's FARCAL facility [J]. *Metrologia*, 1998, 35:323-327.
- [3] CARTER A C, DATLA R U, JUNG T M, *et al.*. Low-background temperature calibration of infrared blackbodies [J]. *Metrologia*, 2006, 43:S46-S50.
- [4] RICE J P, JOHNSON B C. The NIST EOS thermal-infrared transfer radiometer [J]. *Metrologia*, 1998, 35: 505-509.
- [5] MEKHONTSEV S, HANSEN L, LORENTZ S, *et al.*. Primary realization of both spectral radiance and reflectance in the Mid- and Far- infrared for climate change science support [C]. *Proceedings of 11th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry*, USA: NEWRAD, 2011:32-33.

空变温黑体辐射源和真空红外辐射温度计,形成我国红外亮度温度量值传递体系,如图 10 所示。

2015 年上半年装置整体安装和调试、标准黑体辐射源的性能测试、光谱仪的实验测试和不确定度评定等实验验证。2015 年底将完成装置验收,并且为我国风云气象卫星红外遥感定标黑体和星上黑体提供量值校准服务。

#### 4 结 论

本文系统地介绍了国际上红外遥感亮度温度标准装置的研究进展,阐述了 NIM 研制的 VRTSF 红外遥感亮度温度标准装置的详细情况,其温度覆盖 190~340 K,光谱为 1~1 000  $\mu\text{m}$ ,不确定度为 50 mK@300 K/10  $\mu\text{m}$  ( $k=2$ )。该装置与其它国家计量院的标准装置相比,具有扩展性强,标定黑体口径大,不确定度水平高等特点,为我国红外遥感量值水平提高和国际等效提供了重要保障。

- [6] MONTE C, GUTSCHWAGER B, MOROZOVA S P, Radiation thermometry and emissivity measurements under vacuum at the PTB [J]. *Int. J. Thermophys.*, 2009, 30:203-219.
- [7] MONTE C, GUTSCHWAGER B, ADIBEKYAN A, *et al.*. Radiometric calibration of the in-flight blackbody calibration system of the GLORIA interferometer [J]. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 2013, 6:5251-5295.
- [8] MONTE C, GUTSCHWAGER B, ADIBEKYAN A, Radiometric calibration of limb sounders for traceable measurement of atmospheric essential climate variables [C]. *Proceeding of 12th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry*, Finland: NEWRAD, 2014:6-8.
- [9] IVANOV V S, LISIANSKY B E, MOROZOVA S P, *et al.*. Medium-background radiometric facility for calibration of sources or sensors [J]. *Metrologia*, 2002, 37: 599-602.
- [10] MOROZOVA S P, PARFENTIEV N A, LISIANSKY B E, *et al.*. Vacuum variable medium temperature blackbody [J]. *Int. J. Thermophys.*, 2010, 31:1809-1820.

- [11] MOROZOVA S P, PARFENTIEV N A, L ISIANSKY B E, *et al.*. Vacuum variable temperature blackbody VTBB100 [J]. *Int. J Thermophys*, 2008, 29:341-351.
- [12] SAPRITSKY V I, KATYSHEVA A A, KRUTIKOV V N, *et al.*. Standard radiometric facility for preflight calibration of space borne Earth observation instruments in IR spectral range [C]. *Proceeding of 12th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry, Finland; NEWRAD*, 2014; 27-28.
- [13] SAPRITSKY S P, PROHOROV A V. Calculation of the effective emissivities of specular diffuse cavities by the Monte carlo method [J]. *Metrologica*, 1992, 29:9-14.

#### 作者简介:



郝小鹏(1980—),男,天津人,博士,副研究员,2008年于中国科学院高能物理研究所获得博士学位,现为中国计量科学研究院热工计量科学研究所辐射测温实验室副研究员,主要红外亮度温度标准装置和量值传递方法的研究。E-mail: haoxp@nim. ac. cn



许敏(1987—),女,四川资阳人,成都理工大学研究生,主要研究方向为辐射测温。xmhaogq@163. com



宋健(1988—),男,安徽人,硕士在读,2011年北京理工大学机电工程学院获得学士学位,现在中国计量科学研究院热工计量科学研究所辐射测温实验室攻读硕士学位,主要从事红外亮度温度标准装置和星载自校准黑体方面研究。E-mail: songj@nim. ac. cn



原遵东(1960—),北京人,学士,研究员,中国计量科学研究院热工计量科学研究所首席计量师,主要从事辐射测温计量标准的研究。Email: yuanzd@nim. ac. cn



孙建平(1978—),男,陕西眉县人,博士,副研究员,2005年于中国计量学研究院获得硕士学位,2013年于北京科技大学获得博士学位,现为中国计量科学研究院副研究员,主要研究方向为温度计量及材料热物性研究。Email: sunjp@nim. ac. cn



刘曾林(1982—),黑龙江双鸭山人,博士,助理研究员,2013年于中国科学院地理科学与资源研究所获得理学博士学位,现工作于中国计量科学研究院,研究方向为辐射测温。Email: liuzlin@nim. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)