

双通道热红外标准辐亮度计定标方法研究

谢臣瑜^{1,2}, 李健军¹, 庞伟伟¹, 夏茂鹏¹, 郑小兵¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 黑体辐射源作为初级标准, 其辐射特性的测量精度决定了整个标准传递链路的不确定度。为了提高黑体的辐亮度测量精度, 研制了一台可直接观测黑体辐亮度的双通道热红外标准辐亮度计。根据仪器的工作原理, 采用自行研制的高精度水浴黑体获取标准辐亮度计的定标系数。实验结果表明, 该辐亮度计的 1 h 信号非稳定性优于 0.3%, 定标系数拟合不确定度优于 1.23%, 5 μm 通道整体不确定度为 0.39%, 10 μm 通道整体不确定度为 1.3%。可实现黑体辐亮度与实验室辐射标准之间的传递。

关键词: 黑体辐射; 热红外; 红外辐亮度计; 定标

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0404002

Research on calibration method of double-channel thermal-infrared standard radiometer

Xie Chenyu^{1,2}, Li Jianjun¹, Pang Weiwei¹, Xia Maopeng¹, Zheng Xiaobing¹

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Blackbody radiation source as a primary standard, its measurement accuracy determines the uncertainty level of the whole traceability link. To improve the measurement accuracy of blackbodies' radiance, a double-channel thermal-infrared standard radiometer was developed. According to the principle of the instrument, calibration coefficients of the standard radiometer were obtained by using a high accuracy water-bath blackbody. Experimental results suggest that the radiometer's instability is less than 0.3% within one hour, uncertainty of fitting coefficient is less than 1.23%, and combined uncertainty is less than 0.39%, 1.3% in 5 μm and 10 μm channel respectively. This radiometer provides new means for tracing blackbody radiance directly to radiant standard in lab.

Key words: blackbody radiation; thermal-infrared; infrared radiometer; calibration

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(11204318, 61275173); 国家高技术研究发展计划(2015AA123702)

作者简介: 谢臣瑜(1993-), 男, 博士生, 主要从事精密仪器、光谱辐射定标技术方面的研究。Email: xcy1993@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高精度光学遥感辐射定标技术、光学遥感等方面的研究。

Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

0 引言

随着定量遥感技术的发展,对星载传感器发射前的实验室定标精度提出了更高的要求。黑体标准辐射源作为中远红外波段最常用的标准光源,在航天载荷以及各种红外探测器光谱响应度定标实验中都被广泛应用^[1]。传统黑体辐射源定标方法基于黑体 Planck 公式,分别测量其辐射温度和发射率计算黑体辐亮度。由于黑体自身结构决定了黑体发射腔内部温度分布不均匀且受制于温度传感器的测量精度,因此以温度传感器显示的温度作为黑体的辐亮度温度与实际黑体绝对温度具有一定的偏差,再加上黑体发射率测量复杂等因素,导致传统黑体输出辐亮度的定标不确定度较高^[2]。

目前随着红外探测技术的发展,基于标准红外辐亮度计的红外辐射定标已经成为红外波段传感器定标的发展趋势,使用标准红外辐射计作为传递标准定标现场黑体辐射源成为一种常见的应用方式。国内外有多家单位均开展了相关的研究。美国国家标准与技术研究院(NIST)针对卫星遥感器 3~5 μm 和 8~12 μm 两个大气窗口的热红外通道定标,研制了红外辐射计(TXR),报道了 0.16% 的定标不确定度,相当于 300 K 时 5 μm 波段的辐亮度温度不确定度为 0.05 K^[3-5]。国内中国科学院西安光学精密机械研究所研制了面源黑体辐射特性校准装置,用于观测低温真空仓内的黑体,报道了 0.19% 的测量不确定度^[6]。国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制了双通道(1.4±0.02 μm , 4.5±0.03 μm)红外光谱辐射计,用于多波段红外光谱辐射的定标,报道了 5% 的定标不确定度^[7]。

文中针对黑体输出辐亮度的准确测量,提出采用双波段热红外辐亮度的技术方案,通过测量标准黑体输出辐亮度,通过黑体辐射公式得到定标系数,进而用于其他黑体输出辐亮度的定标或亮温的校准。采用热红外标准辐亮度计能够直接测量黑体的绝对辐亮度,避免了由温度和发射率测量引入的不确定度。定标后的热红外辐亮度计可作为传递标准,实现端对端的系统级定标。

文中详细介绍了双通道热红外标准辐亮度计的

辐射测量原理,阐述了基于高精度水浴黑体的热红外辐亮度计的定标方法,针对该热红外辐亮度的定标,研制了高精度的水浴黑体,并利用该水浴黑体开展了双波段热红外辐亮度计的定标实验,最后对定标不确定度进行了评估。

1 双通道热红外辐亮度计介绍

考虑到常温黑体的辐射特性以及大气窗口的特殊性,设计了中心波段为 5 μm 和 10 μm ,带宽皆为 1 μm 的双通道式热红外标准辐亮度计,将光学元件和红外探测器都安装在一个圆形的紫铜板光学平台上,光路布局如图 1 所示。

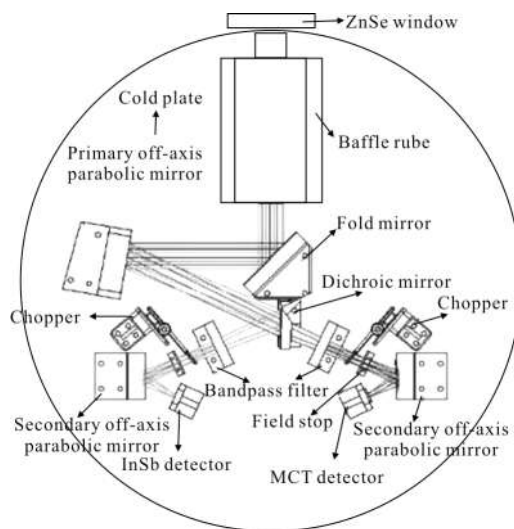


图 1 热红外标准辐亮度计光学结构图

Fig.1 Optical layout of thermal-infrared standard radiometer

入射光透过 ZnSe 光学窗口进入辐射计内部,再经过一个管状光阑筒后到达镀金的平面反射镜,主离轴抛物反射镜将红外光信号反射会聚,

反射会聚的光经过一片以 ZnSe 为基板的镀膜二向色镜,波长小于 7 μm 的红外光被反射,大于 7 μm 的红外光透射,中心波长 5、10 μm 附近的反射率和透射率皆超过 90%,反射光和透射光分别经过带宽 1 μm 的滤光片、视场光阑以及斩波器等,次离轴抛物面镜将红外光信号反射会聚至 InSb、MCT 红外探测器光敏面上。配合使用斩波器及锁相放大器能有效提高系统信噪比。将紫铜板光学平台整体置于液氮制冷的低温真空杜瓦罐中,有效隔绝环境热背景辐射,提高测量精度。

2 基于高精度水浴黑体的热红外辐亮度计定标原理

在利用高精度水浴黑体对红外标准辐亮度计进行定标实验时,在系统线性响应范围内红外辐亮度计的输出信号值 $S(\lambda)$ 可表示为公式(1)^[4]:

$$S(\lambda)=R(L_{\lambda 1}+L_{\lambda 2}) \quad (1)$$

式中: R 为红外探测器的有效响应度; $L_{\lambda 1}$ 为黑体的辐亮度; $L_{\lambda 2}$ 为标准辐亮度计内部自身的光机结构热背景辐亮度总和。黑体的辐亮度 $L_{\lambda 1}$ 定义为:

$$L_{\lambda 1}=\varepsilon(\lambda)B(\lambda, T) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon(\lambda)$ 为黑体的有效发射率; T 为辐亮度温度。 $B(\lambda, T)$ 为黑体 Planck 公式:

$$B(\lambda, T)=\frac{c_1}{\lambda^5 \{\exp[c_2/(\lambda T)]-1\}} \quad (3)$$

其中, c_1 和 c_2 为常用的第一和第二辐射常数,分别表示为:

$$c_1=2\pi hc^2=(3.741\ 5\pm 0.000\ 3)\times 10^{-16}\ \text{W}\cdot\text{m}^2$$

$$c_2=hc/k=(1.438\ 79\pm 0.000\ 19)\times 10^{-2}\ \text{m}\cdot\text{K}$$

红外探测器的输出信号值 $S(\lambda)$ 表达式中,只有 $L_{\lambda 1}$ 与黑体的辐亮度温度 T 有关,因此公式(1)可以简化成红外探测器信号值 $S(T)$ 关于被测黑体辐射温度 T 的形式,如公式(4)所示:

$$S(T)=aB(\lambda, T)+b=a\frac{c_1}{\lambda_0^5 \{\exp[c_2/(\lambda T)]-1\}}+b \quad (4)$$

式中: a 为红外辐亮度计测量系统的辐射响应度,表征系统的测量精度; b 为红外标准辐亮度计内部自身的光机结构热背景引起的偏移量,在低温真空的理想情况下该值近似为 0^[8]。

设置水浴黑体的温度,得出红外探测器的输出信号值 $S(T)$ 和高精度水浴黑体绝对辐亮度温度 T 的对应关系。应用 Matlab 等软件将得到的多组探测器信号值与温度值进行最小二乘法拟合,为简化拟合将公式(4)中的 λ 分别等效为 5 μm 和 10 μm 。最后得出两个观测通道系统的定标系数 a 和 b ,并最终将红外标准辐亮度计应用于其他黑体的辐亮度定标。

3 高精度水浴黑体的研制

为满足该热红外标准辐亮度计的现场定标需

求,研制了高精度水浴黑体并评估了该水浴黑体在热红外辐亮度定标中的不确定度。

由黑体的 Planck 公式可知,黑体的辐射温度和黑体的有效发射率决定了黑体的辐亮度。因此温度和发射率的测量精度将决定黑体的性能^[9]。基于液浴技术的标准黑体是当下高精度黑体的一个研究方向,具有温度均匀性好、控温精度高、液浴与发射腔壁充分接触等优点。特别是针对常温黑体,以水为浴槽循环介质的水浴黑体是目前国内外高精度常温黑体的代表。文中选用的加热恒温浴槽其温控精度为 0.01 $^{\circ}\text{C}$,且整个浴槽置于绝热材料的密闭容器中能减少温度损失,加热器和搅拌器的作用使得浴槽内温度分布更加均匀,可近似等效为黑体的绝对温度。

黑体腔的发射率不仅取决于腔体的形状,还与腔体表面的涂层有关。笔者等设计圆柱+圆锥结构的腔体并结合喷涂红外波段高吸收率涂层的工艺研制出符合实验要求的黑体腔。涂层法向的发射率 ≥ 0.93 ,结构如图 2 所示。

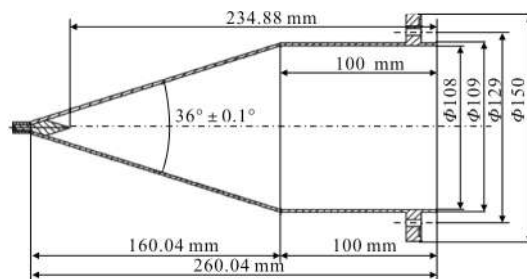


图 2 黑体腔结构示意图

Fig.2 Blackbody cavity structure

腔体材料采用 2A12T4 铝合金,为防止尖点处涂料堆积的影响设计了如图所示的倒锥结构,可有效避免腔体尖端涂料堆积造成的涂层不均匀。利用 Gouffe 理论均匀漫反射模型发射率计算黑体腔的有效发射率,其表达式为^[10]:

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon \left[1 + (1 - \varepsilon) \left(\frac{A}{S_i} - F(x, \Omega) \right) \right]}{\varepsilon \left(1 - \frac{A}{S_i} \right) + \frac{A}{S_i}} \quad (5)$$

式中: A 是开孔面积; S_i 是整个内表面面积(包括开孔面积); ε 是红外涂层有效发射率; $F(x, \Omega)$ 是腔体的角度因子,其中角度因子值参考 NIST 取锥形结

构中点处的值作为整个腔体结构的等效角因子,式中取值为 $0.0355^{[1]}$ 。计算可得 $A=2916\pi\text{ mm}^2$, $S_r=23153\pi\text{ mm}^2$ 。综合可得黑体腔有效发射率值为 0.9969 , 研制出的高精度水浴黑体送至国家计量院检定, 检定结果其有效发射率 >0.997 , 与理论计算基本相符, 满足热红外标准辐亮度计的定标需求。

水浴黑体辐亮度不确定度由辐射温度不确定度和腔体发射率不确定度决定, 两者相互独立。水浴黑体温度不确定度包括: 定标水浴黑体电子温度计不确定度、浴槽自身电子温度计不确定度、浴槽水温非均匀性不确定度以及水浴控温精度等。其辐射温度联合不确定度为 0.025 K , 辐亮度不确定度为 0.073% ; 考虑到发射率不确定度对黑体辐亮度的影响, 黑体辐亮度的表达式可写成:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)L_0(\lambda, T) \quad (6)$$

式中: $\varepsilon(\lambda, T)$ 为黑体有效发射率; $L_0(\lambda, T)$ 为 Planck 公式计算的理想黑体辐亮度。假定发射率 ε 为计算黑体辐亮度唯一不确定度来源时, 发射率不确定度对辐亮度不确定度的影响 μ_ε 可以表示为:

$$\mu_\varepsilon = \frac{\partial L(\lambda, T)}{\partial \varepsilon(\lambda, T)} \mu_\varepsilon = L_0(\lambda, T) \mu_\varepsilon \quad (7)$$

从上式中可以看出, 黑体辐亮度的相对不确定度等于黑体发射率的不确定度。上文中提到高精度水浴黑体的有效发射率大于 0.997 , 将水浴黑体简化为理想黑体处理时(有效发射率等于 1), 发射率最大不确定小于 0.003 。因此水浴黑体发射率对辐亮度造成的最大不确定度小于 0.3% 。联合辐亮度不确定度约为 0.31% , 能够应用于红外设备的高精度辐射定标。

4 热红外辐射计定标实验

为了得出黑体绝对温度与热红外标准辐亮度计探测器输出信号之间的关系, 反演定标系数 a 和 b , 搭建如图 3 所示的实验装置。

水浴黑体腔口直径为 $\Phi 108\text{ mm}$, 腔口与红外标准辐亮度计的距离为 170 mm , 在此条件下黑体辐射将充满辐亮度计的视场。斩波器工作频率为 46.40 Hz , 将信号调制成交流信号后被探测器接收并由前放电路放大, 锁相放大器将斩波器工作频率

处的信号锁相放大, 最后由数据采集器将探测器的信号响应值记录到 PC 电脑中。

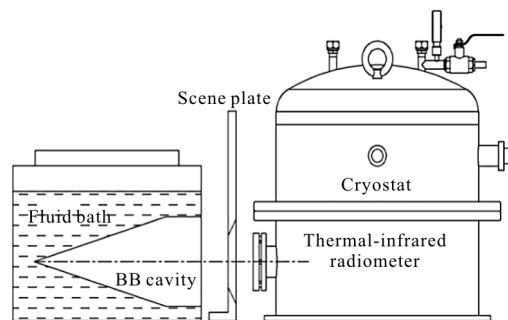


图 3 辐亮度计观测水浴黑体系统示意图

Fig.3 Schematic of radiometer viewing a water-bath blackbody

4.1 热红外标准辐亮度计稳定性测试与分析

在测量黑体辐亮度之前需要对辐亮度计进行稳定性测试与分析, 搭建图 2 所示的实验装置后设置水浴黑体温度为 333.15 K 和 353.15 K , 分别用 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\text{ }\mu\text{m}$ 通道采集探测器输出信号各 1 h 共 360 个电压信号值。数据处理如表 1 所示。

表 1 热红外辐亮度计测量不同温度点的稳定性分析

Tab.1 Stability of thermal-infrared radiometer when measuring at different temperature

Channel/ μm	Tempera- ture/K	Signal/V	Standard deviation	Relative standard deviation
5	333.15	1.961 5	$1.53726\text{E}-4$	0.0078%
5	353.15	3.120 5	$4.84122\text{E}-5$	0.0016%
10	333.15	1.915 3	$5.13\text{E}-03$	0.2678%
10	353.15	2.749 5	$6.19\text{E}-03$	0.2251%

通过实验数据分析可知, 水浴黑体温度为 333.15 K 和 353.15 K , 分别用 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\text{ }\mu\text{m}$ 通道, 双通道热红外标准辐亮度计的稳定性分别为 0.0078% 和 0.2678% 。

4.2 热红外标准辐亮度计定标系数的拟合

设置水浴黑体的温度从 $323\sim 373\text{ K}$ 区间内设定 10 个温度点, 用红外标准辐亮度计的 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\text{ }\mu\text{m}$ 通道分别观测, 用数据采集器采集每个温度点的 60 组数据的平均值作为探测器在该温度下的信号值。测试结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 5 μm 通道下各温度点辐亮度计观测水浴黑体的信号值

Tab.2 Signals of radiometer at different temperature of water-bath blackbody in 5 μm channel

Number	Temperature/K	Signal/V
1	318.15	1.322 12
2	323.15	1.510 27
3	328.15	1.727 39
4	333.15	1.961 5
5	338.15	2.207
6	343.15	2.485 98
7	348.15	2.788 54
8	353.15	3.120 46
9	358.15	3.483 87
10	363.15	3.872 69

表 3 10 μm 通道下各温度点辐亮度计观测水浴黑体的信号值

Tab.3 Signals of radiometer at different temperature of water-bath blackbody in 10 μm channel

Number	Temperature/K	Signal/V
1	323.15	1.490 27
2	328.15	1.702 42
3	333.15	1.915 32
4	338.15	2.141 48
5	343.15	2.345 06
6	348.15	2.550 56
7	353.15	2.749 48
8	358.15	2.958 78
9	363.15	3.212 96
10	368.15	3.400 21

将水浴黑体设置温度 T 和红外辐亮度计响应值 S 代入拟合公式(4), 利用最小二乘法得到定标系数 a 、 b 值, 拟合所得曲线如图 4 所示, 定标系数

值如表 4 所示。

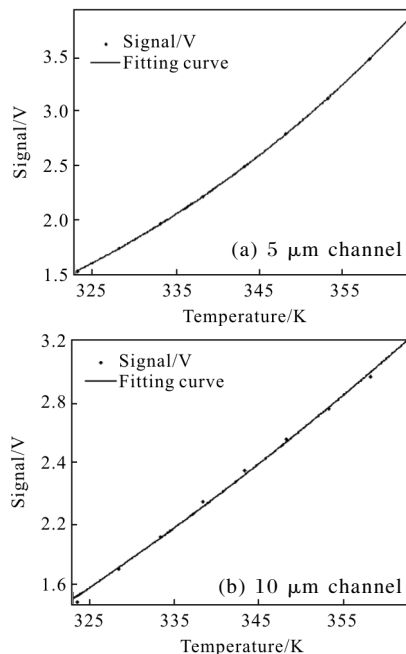


图 4 最小二乘法拟合的黑体温度和辐亮度信号曲线
Fig.4 Least-square fitting of black-body temperature versus radiometer signals

表 4 拟合所得定标系数 a 、 b 值

Tab.4 Fitting calibration coefficient a , b

Calibration coefficient	Value
5 μm channel a	0.273 23
5 μm channel b	0.107 31
10 μm channel a	0.187 25
10 μm channel b	1.102 86

4.3 双通道红外标准辐亮度计的不确定度分析

高精度水浴黑体定标热红外标准辐亮度计不确定来源包括: 标准辐亮度计定标过程中的噪声 μ_n , 最小二乘法拟合不确定度 μ_f , 高精度水浴黑体不确定度 μ_w 。

红外标准辐亮度计噪声产生的不确定度可由公式(8)表示:

$$\mu_n = \frac{\sigma_n(T)}{r(T)} \quad (8)$$

式中: $\sigma_n(T)$ 为黑体在温度为 T 时辐亮度计输出信号值的标准偏差; $r(T)$ 为采集信号值的均值。分析数据可得, 高精度水浴黑体定标红外标准辐亮度计过程中, 5 μm 通道下当温度为 333.15 K 时, 辐亮度计噪

声产生的不确定值最大,为 0.007 8%;10 μm 通道下当温度为 323.15 K 时,辐亮度计噪声产生的不确定值最大,为 0.29%。

黑体辐亮度值的变化 ΔL 产生的辐亮度计信号响应化 ΔS 可以用公式(9)表示:

$$\Delta S = \frac{dS}{dL} \Delta L = a \Delta L \quad (9)$$

系数 a 是传递黑体辐亮度变化 ΔL 和辐亮度计信号变化 ΔS 的唯一影响因素,因此拟合不确定度可以通过定标系数 a 值来评估。

$$\mu_f = \frac{\sigma_a}{a} \quad (10)$$

式中:σ_a为用最小二乘法拟合得到的系数 a 值的标准偏差,得出不确定度在 5 μm 通道下 μ_f 值为 0.239%;10 μm 通道下相对标准偏差 μ_f 值为 1.23%。

高精度水浴黑体不确定度,水浴黑体作为热红外标准辐亮度计定标的标准光源,其辐亮度计不确定度将直接影响标准辐亮度计的最终测量不确定度。水浴黑体简化为理想黑体辐射源过程中,温度对辐亮度的影响和发射率对辐亮度的影响是相互独立的,水浴黑体简化为理想黑体的不确定度,联合不确定度为 0.31%,该结果溯源至国家计量研究院。

表 5 表明,热红外标准辐亮度计利用 5 μm 通道来定标黑体辐亮度的联合不确定度为 0.39%;利用 10 μm 通道来定标黑体辐亮度的联合不确定度为 1.3%。

表 5 辐亮度计测量黑体辐亮度联合不确定度

Tab.5 Combined uncertainty of blackbody's radiance measured by radiometer

Source of uncertainty	Symbol	Uncertainty type	Value (5 μm channel)	Value (10 μm channel)
Noise during calibration	<i>u_n</i>	A	0.007 8%	0.29%
Fitting to interpolation function	<i>u_f</i>	A	0.239%	1.23%
Water-bath blackbody uncertainty	<i>u_w</i>	B	0.310%	0.310%
Combined uncertainty	<i>u_c</i>		0.39%	1.30%

5 结 论

黑体在遥感器热红外波段的定标中具有重要的应用,针对黑体输出辐亮度的准确测量,文中提出了采用双通道热红外标准辐亮度计的技术方案,利用溯源于国家计量院的高精度水浴黑体作为红外标准辐射源对标准辐亮度计进行定标,获得了 5 μm 通道优于 0.39%,10 μm 通道优于 1.3% 的定标不确定度。说明了该红外辐亮度计可作为现场黑体辐射源与实验室辐射标准之间的传递标准。

目前仅采用水浴黑体开展了定标实验,相关的定标工作仅在 313.15~368.15 K 温度范围内展开,数据分析结果表明,在 323.15 K 以下温度范围内,测量数据开始偏离定标结果。根据目前的测量电压值水平,从理论上该红外辐亮度计还可用于更高温度黑体的检测。此外,双波段红外辐亮度计的光学系统和探测单元均置于低温真空杜瓦中,适用于基于低温辐射计的实验室辐射传递链,采用低温辐射计这一目前精度最高的辐射基准有望进一步提高双波段热红外辐亮度计的定标精度。相关的研究工作将在下一步逐步开展。

参考文献:

- [1] Xu Jun, Meng Binghuan, Zheng Xiaobing, et al. Calibration of common temperature blackbody based on thermal-infrared standard radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 43(3): 716-721. (in Chinese)
- [2] Chen Muwang, Qi Hongxing, Gong Yumei, et al. Analysis of effect of calibration blackbody temperature stability on the infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 652-654. (in Chinese)
- [3] Rice J P, Johnson B C. The NIST EOS thermal infrared transfer radiometer[J]. *Metrologia*, 2010, 35: 505-509.
- [4] Rice J P, Bender S C, Atkins W H, et al. Deployment test of the NIST EOS thermal-infrared transfer radiometer [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24 (2): 367-388.
- [5] Adriaan C C, Raju U D, Timothy M J, et al. Low-background temperature calibration of infrared blackbodies [J]. *Metrologia*, 2006, 43: 46-50.

- [6] Yue Wenlong. Research of the calibration technology for blackbody radiation source [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2007. (in Chinese)
- [7] Zhu Qihai, Li Xiansheng, Ren Jianwei, et al. Development and calibration of infrared double-channel spectral radiometer[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 773-778. (in Chinese)
- [8] Zhang Lei, Zheng Xiaobing, Zhang Liming, et al. High accuracy water bath blackbody based on the information quantification of infrared remote sensing [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(2): 245-251. (in Chinese)
- [9] Zhang Lei. Study on the spectral radiometric calibration technique of infrared stand transfer detector [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [10] Fang Qianqian, Fang Wei, Wang Kai, et al. Calculation of effective of blackbody cavities by Monte-Carlo method [J] *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 167-173. (in Chinese)
- [11] Xun Jun. Research on calibration of ambient temperature blackbodies based on a thermal-infrared standard Radiometer [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)