

基于热红外标准辐亮度计的常温黑体定标技术

徐 骏, 孟炳寰, 翟文超, 丁 蕾, 郑小兵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,
安徽 合肥 230031)

摘 要: 常温黑体作为红外光电探测系统的定标光源, 其辐亮度的不确定度直接决定了被定标红外系统的探测精度。为了提高黑体的现场定标精度, 采用标准辐亮度计开展了面型和腔型结构的三种黑体的辐射定标实验研究。标准辐亮度计溯源于国家计量院标准黑体, 不确定度为 0.22%。通过直接测量三种黑体的绝对辐亮度, 获得了辐亮度温度, 并进一步导出了发射率。结果表明, 三种黑体的设置温度与其辐亮度温度存在 0.6~2.6 K 的差异, 由此产生的绝对辐亮度的不确定度达 1.4%~5.5%。基于标准辐亮度计的直接定标法避免了温度和发射率测量引入的不确定度, 有利于实现黑体现场系统级定标和绝对辐亮度监测。

关键词: 热红外标准辐亮度计; 黑体; 定标; 发射率

中图分类号: O432.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)03-0716-06

Calibration of common temperature blackbody based on thermal-infrared standard radiometer

Xu Jun, Meng Binghuan, Zhai Wenchao, Ding Lei, Zheng Xiaobing

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanical, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Radiance uncertainties of common temperature blackbodies determine the detection accuracy of infrared optoelectronic detector systems. To improve the on-site calibration accuracy of blackbodies' radiance, a standard radiometer was used to calibrate three blackbodies, including one cavity blackbody and two surface blackbodies. The standard radiometer was traced to a standard blackbody hold by National Institute of Metrology of China and obtain a uncertainty of less than 0.22%. Brightness temperatures and effective emissivities were acquired by measuring three blackbodies' radiance directly. The results show deviations of 0.6 K to 2.6 K between brightness temperatures and setting temperatures for all three blackbodies, which correspond to absolute radiance uncertainties from 1.4% to 5.5%. The direct calibration method based on standard radiometer avoids the uncertainties from measurements of temperature and emissivity, and can be used to realize on-site system-level calibrations of blackbodies and absolute radiance monitoring.

Key words: thermal-infrared standard radiometer; blackbody; calibration; emissivity

收稿日期: 2013-07-07; 修订日期: 2013-08-06

基金项目: 安徽省自然科学基金(090412042); 中科院安徽光学精密机械研究所所长基金(Y03AG31145)

作者简介: 徐骏(1986-), 男, 博士生, 主要从事光辐射定标、精密仪器与机械方面的研究。Email: xujun@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。Email: xbzhen@aiofm.ac.cn

0 引言

常温黑体一般指辐射温度范围在 200~400 K 的黑体,广泛应用于中、长波红外光电探测系统的绝对辐射定标^[1],其辐亮度的不确定度直接决定了被定标红外系统的探测精度^[2]。近年来随着空间遥感、环境和气候监测量化要求的不断提高,迫切需要高精度、操作便捷的传递标准,能够实现黑体使用现场的高精度定标,以进一步提升红外光电探测的精度水平。

传统的黑体定标一般采用间接测量法,即测量黑体温度 T 和发射率 ε 后依据 Planck 公式计算黑体的绝对辐亮度。金属凝固点黑体具有较高的绝对温度测量精度^[3],但由于其结构和操作复杂性,以及价格昂贵,一般用于建立实验室基准。红外光电系统现场定标使用的黑体大多在黑体腔内不同位置安装多个温度传感器,如 Pt 电阻温度计,测量温度并监控温度场的变化。接触式温度传感器的测量值与黑体真实辐射温度之间存在偏差,使用过程中各温度传感器的响应也会逐渐出现差异。NIST(美国国家标准与技术研究所)研究表明,辐射温度测量不确定度可达 0.2 K 以上^[4]。近年来随着液浴黑体技术的发展,辐射温度测量不确定可以降到 0.015 K 以内^[5-6]。

黑体发射率与工作波段、温度、结构、涂层等多种因素有关,受累积使用时间和使用环境的影响,发射率可能发生持续的变化,其精确测量需要特种的设备条件支持。根据 Planck 公式计算,0.2 K 的辐射温度不确定度或 0.7% 的发射率不确定度均会导致黑体辐亮度不确定度 0.7%。对于大多数现场应用的黑体,多不具备温度传感器实时校准和发射率测量的专用设备,这是影响红外光电系统现场定标精度稳定性的重要因素。

利用标准辐射计直接测量黑体绝对辐亮度,是近年来黑体定标的一种新技术途径。由于避免了温度和发射率测量环节,黑体定标的不确定因素更容易控制和评价。红外探测器性能的提升,以及直接溯源于凝固点黑体或低温辐射计的便捷性,为直接法黑体定标精度的提高提供了可行性。

目前国内外相继开展了基于标准辐射计的黑体辐射定标方法研究。Rice^[7]等研制的热红外传递辐射计 TXR(Thermal-infrared transfer radiometer),不确定度达 0.16%,已应用于船载黑体现场高精度定标。Theocharous^[8]等设计了黑体辐射绝对测量装置 AMBER

(Absolute measurements of black-body emitted radiance),用于实验室黑体辐射定标。该装置采用溯源于低温辐射计方案,预期不确定度为 0.1%。胡铁力^[9]等研制的面源黑体辐射特性校准装置不确定度为 0.9%,用于真空仓中黑体定标。朱启海^[10]等研制的双通道 ($1.4 \pm 0.02 \mu\text{m}$, $4.5 \pm 0.03 \mu\text{m}$) 红外光谱辐射计不确定度为 5%,用于现场黑体定标。

作者前期针对腔型和面型黑体的现场定标,研制了热红外标准辐亮度计,联合不确定度为 0.22%,相当于 313 K 黑体辐亮度温度不确定度 76 mK^[11]。文中在此基础上,介绍了基于标准辐亮度计的红外标准传递方法,利用标准辐亮度计开展了腔型和面型结构的三种黑体定标实验,获得了辐亮度温度、绝对辐亮度,给出了各温度点辐亮度温度、辐亮度测量值与设定值之间的偏差,导出了发射率,并分析了定标的不确定度。

1 热红外标准辐亮度计及其定标

1.1 热红外标准辐亮度计

热红外标准辐亮度计是一台低温制冷的滤光片辐射计,采用离轴反射式光路结构,通光孔径 $\Phi 20 \text{ mm}$,视场角 $\pm 1^\circ$,滤光片通光波段 $4.7 \sim 5.6 \mu\text{m}$,InSb 探测器响应峰值波长 $4.8 \mu\text{m}$,内部采用斩波器配合锁相放大器实现低噪声信号采集。系统主光路和探测器均置于液氮制冷的低温真空杜瓦中,以降低背景热辐射和电子学噪声对测量的影响。辐亮度计光学结构如图 1 所示。

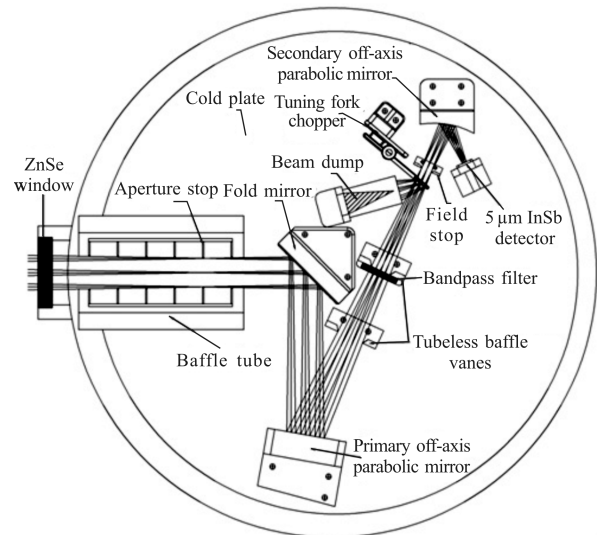


图 1 热红外标准辐亮度计光学结构图

Fig.1 Optical layout of thermal infrared radiometer

1.2 热红外标准辐亮度计定标

文中采用中国计量科学研究院的可变温标准黑体定标热红外标准辐亮度计,标准黑体溯源于金属凝固点黑体,标准传递流程如图 2 所示,具体步骤如下。

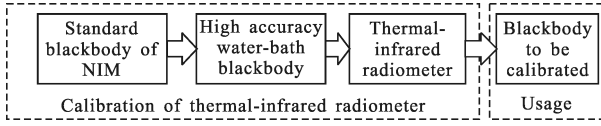


图 2 标准传递流程图

Fig.2 Flow chart of standard transferring

(1) 可变温标准黑体定标大口径高精度水浴黑体,确定其绝对辐亮度。

国家计量院的可变温标准黑体口径为 $\Phi 20\text{ mm}$,无法充满辐亮度计的视场,并且辐亮度计需要现场实时定标,因此研制了一台大口径高精度水浴黑体,用于辐亮度计的定标。水浴黑体工作温度为环境温度 $\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$,腔口直径 $\Phi 108\text{ mm}$,温控精度优于 0.01 K 。水浴黑体温度溯源于计量院标准铂电阻温度计,发射率通过 Raytek 红外辐射测温仪比对测量水浴黑体与计量院标准黑体得到,计算公式如公式(1)所示,其中 F_{π} 是待测黑体的全辐射温度(K), T_b 是与待测黑体温度相同时的黑体的绝对温度(K)。

$$\varepsilon = \frac{L_t}{L_b} = \frac{M_t/\pi}{M_b/\pi} = \left(\frac{F_{\pi}}{T_b}\right)^4 \quad (1)$$

定标后的水浴黑体性能指标^[5]:有效发射率 ≥ 0.998 ,测温联合不确定度优于 0.015 K 。

(2) 水浴黑体定标标准辐亮度计,确定其定标系数。

水浴黑体设置一系列温度 T ,辐亮度计观测水浴黑体得到一系列响应 $S(T)$,以 Planck 公式为拟合函数,采用最小二乘法拟合建立二者关系,见公式(2),拟合曲线如图 3 所示。

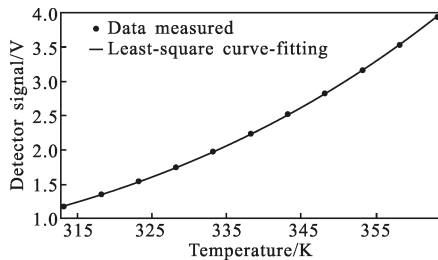


图 3 用最小二乘法拟合的黑体温度和信号关系曲线

Fig.3 Least-square fitting of radiometer signals versus blackbody temperature

$$S(T) = \alpha L(\lambda, T) + b = a \frac{c_1}{\lambda_0^5 \{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1\}} + b \quad (2)$$

式中: c_1 为第一辐射常数 $1.191\ 066 \times 10^8\ \text{W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$; c_2 是第二辐射常数 $1.438\ 786 \times 10^4\ \mu\text{mK}$; λ_0 为等效拟合波长; T 为水浴黑体设置温度。公式(2)将水浴黑体作为理想黑体辐射源(发射率为 1,设置温度即为黑体辐射温度),这种简化对定标结果的影响在定标不确定度分析中给出了定量评估(见表 1)。

由公式(2)拟合得到辐亮度计定标系数 a, b 值: $a=0.280\ 20, b=0.090\ 97$ 。定标不确定度包括^[11]:仪器噪声,系数 a 的拟合不确定度,以及水浴黑体简化为理想黑体处理后绝对辐亮度的不确定度(可通过 Planck 公式计算,包含温度和发射率的影响)。联合不确定度如表 1 所示。

表 1 辐亮度计定标联合不确定度

Tab.1 Combined uncertainty of the radiometer

Source of uncertainty	Symbol	Value	Corresponding to brightness temperature uncertainty at 313 K/mK
Noise during calibration (313 K)	u_n	0.052%	-
Fitting to interpolation function	u_f	0.046%	-
Water-bath blackbody uncertainty including temperature and emissivity	u_w	0.210%	-
Combined uncertainty	u_c	0.222%	76 mK

2 基于标准辐亮度计的黑体定标

2.1 黑体定标原理

(1) 辐亮度温度、辐亮度定标原理

根据公式(2),用辐亮度计观测待定标黑体,可由信号值 S 计算待定标黑体的辐亮度温度 T_f 和辐亮度 L ,分别如公式(3)和(4)所示。

$$T_f = \frac{c_2}{\lambda \ln \left[\frac{ac_1}{\lambda^5(S-b)} + 1 \right]} \quad (3)$$

$$L = (S-b)/a \quad (4)$$

(2) 发射率定标原理

辐亮度计交替观测水浴黑体和待定标黑体。辐

亮度计观测水浴黑体时,接收到的总辐亮度由两部分组成,一部分是温度为 T_c 的水浴黑体自身辐亮度,另一部分是被黑体反射的温度为 T_s 的环境辐亮度,测量方程如公式(5)所示。

$$L_w = \varepsilon_w B(\lambda, T_c) + (1 - \varepsilon_w) B(\lambda, T_s) \quad (5)$$

式中: L_w 和 ε_w 分别表示辐亮度计接收的总辐亮度和水浴黑体的有效发射率; $\varepsilon_w B(\lambda, T_c)$ 表示水浴黑体温度为 T_c 时的辐亮度; $(1 - \varepsilon_w) B(\lambda, T_s)$ 表示水浴黑体反射的温度为 T_s 的环境辐亮度。

同理,辐亮度计观测待定标黑体时,接收到的总辐亮度也由两部分组成,测量方程如公式(6)所示。

$$L_x = \varepsilon_x B(\lambda, T_c) + (1 - \varepsilon_x) B(\lambda, T_s) \quad (6)$$

式中: L_x 和 ε_x 分别表示辐亮度计接收的总辐亮度和待定标黑体的有效发射率; $\varepsilon_x B(\lambda, T_c)$ 表示待测黑体温度为 T_c 时的辐亮度; $(1 - \varepsilon_x) B(\lambda, T_s)$ 表示待测黑体反射的温度为 T_s 的环境辐亮度。

公式(6)中的 L_x 可以由辐亮度计观测待定标黑体的信号值 S 代入公式(4)计算得到。将公式(5)减去公式(6)得到水浴黑体与待测黑体的辐亮度差值 ΔL 如公式(7)所示。

$$\Delta L = (\varepsilon_w - \varepsilon_x) B(\lambda, T_c) + (\varepsilon_x - \varepsilon_w) B(\lambda, T_s) \quad (7)$$

式中:右侧第一项随黑体温度 T_c 变化;第二项与 T_c 无关。因此公式(7)可以写成关于温度为 T_c 的黑体辐亮度 $B(\lambda, T_c)$ 的线性形式,即

$$\Delta L = mB(\lambda, T_c) + n \quad (8)$$

式中: $B(\lambda, T_c)$ 是温度为 T_c 的理想黑体辐亮度。将实验所得的一组 ΔL 和理想黑体辐亮度 $B(\lambda, T_c)$ 值代入拟合公式(8),得到系数 m 和 n 。因斜率 $m = (\varepsilon_w - \varepsilon_x)$,可导出待定标黑体发射率 ε_x 。

2.2 黑体定标实验

调节待定标黑体与辐亮度计同光轴,相距209 mm,此时三种待定标黑体的有效发光面均能充满辐亮度计的视场。实验室环境温度 24 ± 1 °C,相对湿度 19%,实验原理图如图 4 所示。

参与定标实验的 3 个待定标黑体参数如表 2 所示,每个黑体从 30~95 °C 间隔 5 °C 设置一个测量温度点,用辐亮度计观测,每个温度点辐亮度计采集 200 组数据历时 200 s,取平均值作为该温度点的信号值。

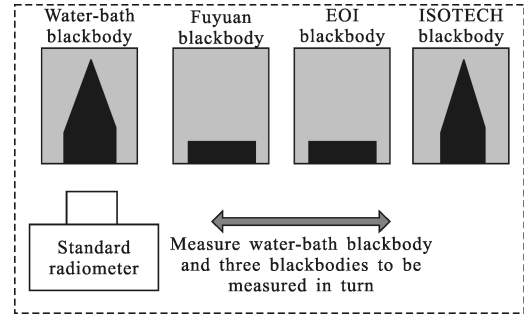


图 4 热红外标准辐亮度计定标黑体原理图

Fig.4 Schematic of thermal infrared radiometer viewing blackbodies

表 2 参与测量的三个黑体参数

Tab.2 Parameters of three participating blackbodies

Num	Name	Main parameter	Unit
1	Fuyuan blackbody	Surface blackbody, emissivity: ≥ 0.95 ; temperature resolution: 0.1 °C; temperature controlling accuracy: 0.15 °C; effective area: $\Phi 120$ mm	AIOFM
2	EOI blackbody	Surface blackbody, emissivity: ≥ 0.986 ; temperature resolution: 0.01 °C; temperature controlling accuracy: 0.01 °C; effective area: 102×102 mm	NIM (standard blackbody)
3	ISOTECH blackbody	Cavity blackbody, emissivity: ≥ 0.995 ; temperature resolution: 0.01 °C; temperature controlling accuracy: 0.01 °C; effective area: $\Phi 60$ mm	NIM

3 数据处理与分析

3.1 待测黑体辐亮度温度定标结果

根据公式(3),可由辐亮度计观测待定标黑体的信号值 S 计算三个待定标黑体的辐亮度温度 T_f ,将辐亮度温度减去待定标黑体设置温度得到温度偏差 ΔT ,如图 5 所示。图 5 表明,三个待定标黑体不同

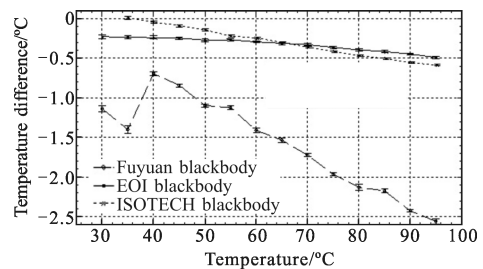


图 5 黑体辐亮度温度与设置温度之间的偏差

Fig.5 Difference between brightness temperature and setting temperature

温度点的辐亮度温度都要小于各自的设置温度,其中福源黑体偏差最大,95℃时达 2.6℃,相对偏差为 2.74%。EOI 黑体和 ISOTECH 黑体则相对较小,95℃时都在 0.6℃以内,相对偏差小于 0.63%。

3.2 待测黑体辐亮度定标结果

根据公式(4),可由辐亮度计观测待定标黑体的信号值 S 计算三个待定标黑体的辐亮度 L_x ,将高精度水浴黑体的辐亮度减去待定标黑体辐亮度得到辐亮度差值 ΔL ,如图 6 所示。图 6 表明,三个待定标黑体不同温度点的辐亮度值与水浴黑体的辐亮度值之间存在偏差,在接近环境温度时偏差较小,随温度增加偏差增大。其中福源黑体偏差最大,在 368.15 K 时达 $0.8 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$,相对偏差为 5.5%;EOI 和 ISOTECH 黑体在 368.15 K 时偏差最大,为 $0.2 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$,相对偏差 1.4%。

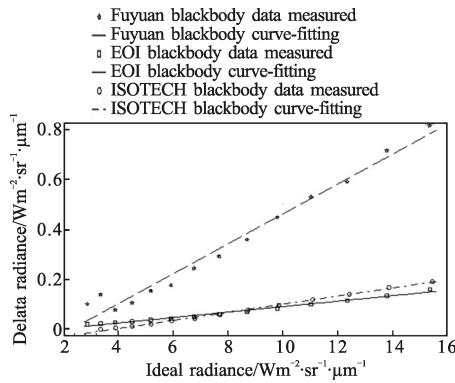


图 6 黑体辐亮度测量值与理想辐亮度的偏差及拟合曲线

Fig.6 Difference between ideal radiance and measured radiance

3.3 待测黑体发射率定标结果

将上节所得的各温度点辐亮度差值 ΔL 和理想黑体辐亮度 $B(\lambda, T_c)$ 代入公式(8),拟合得到系数 m 和 n ,如图 6 所示。

通过 m 值可以计算待测黑体发射率 ϵ_x ,不确定度包括:辐亮度计不确定度,拟合不确定度,黑体设置温度 T_c 偏差造成的不确定度。其值如表 3 所示。其中,拟合对定标发射率不确定度的贡献 u_f 可以用公式(9)计算,其中 σ_m 为拟合系数 m 的标准偏差。

$$u_f = \frac{\sigma_m}{m} \quad (9)$$

黑体设置温度 T_c 不确定度对定标发射率的不确定贡献可以用公式(10)计算,其中 $d\epsilon/dT_c$ 是 Planck 公式发射率 ϵ 对温度 T_c 求导, ΔT_c 是黑体设置温度

不确定度。

$$u_{T_c} = [(d\epsilon/dT_c) \times \Delta T_c] / \epsilon \quad (10)$$

表 3 热红外辐亮度计定标黑体发射率结果

Tab.3 Result of infrared radiometer calibrating blackbodies' emssivity

Name	Fuyuan blackbody	EOI blackbody	ISOTECH blackbody
$m = \epsilon_{\text{WBBB}} - \epsilon_{\text{BBX}}$	0.060 01	0.010 95	0.016 31
$n = (\epsilon_{\text{BBX}} - \epsilon_{\text{WBBB}})B(\lambda, T_c)$	-0.136 40	-0.018 14	-0.061 98
Emissivity of blackbodies (ϵ_{BBX})	$\geq 0.937 99$	$\geq 0.987 05$	$\geq 0.981 69$
Uncertainty of radiometer (u_r)	0.222%	0.222%	0.222%
Contribution of fitting uncertainty to $\epsilon_{\text{BBX}}(u_f)$	4.37%	3.40%	1.67%
Contribution of setting temperature (T_c) deviation to $\epsilon_{\text{BBX}}(u_{T_c})$	0.474%	0.0315%	0.0305%
Combined uncertainty (u)	4.41%	3.41%	1.74%

数据表明,辐亮度计定标国家计量院 EOI 标准黑体的发射率值 $\geq 0.987 05$,与计量院标准值 (≥ 0.986) 相吻合,偏差为 0.001 05,相对偏差小于 0.1%,因此利用辐亮度计定标待测黑体发射率值是可信的。与表 2 比较,福源黑体和 ISOTECH 黑体的发射率值都比厂家标示的值要小,造成发射率衰减的原因是多方面的,可能是长时间灰尘的堆积,也可能是黑体涂层本身性能的衰变等。因此待测黑体使用时需要考虑由于发射率衰减带来的辐亮度偏差。

4 结论

文中利用热红外标准辐亮度计对三种腔型和面型黑体开展了辐射定标实验,获得了待定标黑体辐亮度温度、绝对辐亮度及发射率。结果表明,在溯源于国家计量院标准黑体的情形下,直接法黑体定标可以实现 0.22% 的绝对不确定度。标准辐亮度计可以直接测量黑体绝对辐亮度,满足常温黑体的现场定标需求,避免了黑体温度传感器校准和发射率测量的技术复杂性,并可以监测黑体使用过程中辐射温度和发射率的变化。在溯源于低温辐射计后,直接法黑体定标的绝对精度有进一步提升的潜力。

参考文献:

- [1] Yang Ciyin, Cao Lihua. Radiation calibration and error analysis for a large-aperture infrared opto-electric system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (9): 1624-1628. (in Chinese)
杨词银, 曹立华. 大口径红外光电系统辐射定标及误差分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1624-1628.
- [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)
陈木旺, 齐洪兴, 龚玉梅, 等. 定标黑体的温度稳定性对热成像的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 652-654.
- [3] Yue Wenlong. Research of the calibration technology for blackbody radiation source [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2007. (in Chinese)
岳文龙. 黑体辐射源校准技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2007.
- [4] Adriaan C Carter, Raju U Datla, Timothy M Jung, et al. Low-background temperature calibration of infrared blackbodies[J]. *Metrologia*, 2006, 43: 46-50.
- [5] Fowler J B. A third generation water bath based blackbody source [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1996, 100(5): 591-599.
- [6] 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)
张磊, 郑小兵, 张黎明, 等. 量化红外遥感应用的高精度水浴黑体[J]. 光学技术, 2007, 33(2): 245-251.
- [7] Rice J P, Jophnson B C. The NIST EOS thermal-infrared transfer radiometer[J]. *Metrologia*, 1998, 35(4): 505-509.
- [8] Theocharous E, Fox N P, Sapritsky V I, et al. Absolute measurements of black-body emitted radiance[J]. *Metrologia*, 1998, 35(4): 549-554.
- [9] Hu Tieli, Zhu Mingyi, Zhu Minggui, et al. Calibration for radiation characteristic of extend blackbody [J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(3): 1-4. (in Chinese)
胡铁力, 朱明义, 朱铭桂, 等. -60-80 °C面源黑体辐射特性校准系统[J]. 应用光学, 2002, 23(3): 1-4.
- [10] Zhu Qihai, Li Xiansheng, Ren Jianwei, et al. Development and calibration of infrared double-channel spectral radiometer [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 773-774, 778. (in Chinese)
朱启海, 李宪圣, 任建伟, 等. 双通道红外光谱辐射计的研制及标定[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 773-774, 778.
- [11] Xu Jun, Meng Binghuan, Zheng Xiaobing, et al. Development and calibration of thermal-infrared standard radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (4): 863-868. (in Chinese)
徐骏, 孟炳寰, 郑小兵, 等. 热红外标准辐亮度计的研制及定标[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 863-868.